

UNIVERSIDAD DE PINAR DEL RÍO
"HNOS SAÍZ MONTES DE OCA"
FACULTAD FORESTAL Y AGRONOMÍA

CENTRO DE ESTUDIOS FORESTALES

**BASES ECOFISIOLÓGICAS PARA MANEJO DEL ESTRÉS
HÍDRICO EN PLANTACIONES DE *Cedrela odorata* L.
EN UNA ZONA SEMIÁRIDA DEL VALLE DEL YAQUI,
SONORA, MÉXICO**

**Tesis presentada en opción al grado científico de
Doctor en Ciencias Forestales**

Autor: MSc. Ovidio Alejandro Villaseñor López

**Tutores: Prof. Tit. Dr.C Yudel García Quintana
Prof. Tit. Dr.C Marta Bonilla Vichot**

**PINAR DEL RÍO
2013**

AGRADECIMIENTOS

Mi agradecimiento a la República de Cuba, representada de forma honorable en la Universidad Pinar del Río “Hermanos Saíz Montes de Oca” por haberme permitido conocer personas extraordinarias comprometidas con la ciencia y brindarme los conocimientos necesarios para la construcción de una sociedad más justa en armonía con el planeta. Al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias y su gran aportación a la agricultura del Valle del Yaqui. Al Instituto Tecnológico de Sonora por brindarme la oportunidad de superarme profesionalmente y contribuir a la transformación de México.

A mis profesores: Dr. Pedro Antonio Alvarez Olivera, Dra. Marta Bonilla Vichot y Dr. Yudel García Quintana por su valiosa participación en el presente trabajo.

A mis compañeros y amigos que han formado parte de mi desarrollo profesional: Ing. Jesús Carlos Valle Gámez y familia, Dr. Luis Miguel Tamayo Esquer, Dr. Isidro Roberto Cruz Medina, Dr. Oscar Russo Vogel, Dr. Jaime Garatuza Payán, Dr. Ynocente Betancourt Figueras, Dra. Milagros Cobas López, Dr. Enrico Yopez González, Dr. Salvador Díaz Maldonado, Dr. Marco Antonio Gutiérrez Coronado, Dra. María Isabel Estrada Alvarado, Dr. José Félix Rodríguez Hernández, Dr. Eduardo Gonzalez Izquierdo, Dr. José Rodolfo Clemente Reséndiz Melgar, Dr. Ramón Casillas Hernández, Dr. Fernando Lares Villa, Dr. Pablo Gortáres Moroyoqui, Mtro. Jorge Agustín Lizárraga Rocha, Mtra. Isabel Cabrera Collado, Mtra. Margarita Zárate Osorio, Mtro. Eliseo Ortiz Enríquez, Mtro. Rafael Borquez Olguín, Mtro. Rafael Borquez López, Mtro. Yasiel Arteaga Crespo, Mtro. Jesús Odilón Valdenebro Ruiz, Mtro. Roberto Munguía Valencia, Mtro. Francisco Enrique Montaña Salas, Ing. Rodrigo Erwin Cabanillas Beltrán, Ing. Jorge Arturo Fernández Bocardo, Arq. Hector Esquer Rivas y al Lic. Lázaro Cárdenas Batel a quien debo mi vocación forestal.

A mis padres, mi familia y mi esposa Beatriz por fomentar el amor, apoyarme incondicionalmente y conducirme dentro de una vida de valores y respeto a mi entorno.

DEDICATORIA

*A mi familia, a los amigos que elegí como hermanos, a los hijos que algún día
vendrán y heredarán la tierra que cultivaré hasta el último día.*

SÍNTESIS

Se determinan las bases ecofisiológicas para manejo del estrés hídrico en plantaciones de *Cedrela odorata* L. en una zona semiárida del Valle del Yaqui, Sonora México a partir de la caracterización de atributos sobre economía hídrica de la especie en diferentes periodos estacionales y la evaluación de la respuesta ecofisiológica una vez que se logró estabilizar el riego. Para ello se utilizaron herramientas fisiológicas avanzadas (sensores ecomatik, watermark, cámara de scholander e irgaporómetro) que permitieron monitorear el comportamiento de datos funcionales relacionados con la contracción y dilatación del tallo, humedad del suelo, y medidas de intercambio gaseoso. Los resultados muestran niveles de variación en cuanto la demanda hídrica en los diferentes periodos estaciones, con un requerimiento de 192 litros cada tres días durante el verano. Se demostró a través del potencial hídrico y sus componentes que la especie *Cedrela odorata* presenta mecanismos fisiológicos que le permiten mantener la turgencia celular en las condiciones de suelo vertisol compactado. La respuesta fisiológica de las plantas mostró un patrón de variación diurna determinado por las condiciones microclimáticas de la región (déficit de presión de vapor, temperatura de la hoja y radiación fotosintéticamente activa), lo cual responde favorablemente mediante la frecuencia de riego establecida. La especie, al cuarto año de plantada, mostró un crecimiento ascendente a ritmos acelerados, en sincronía con los periodos estacionales, demostrándose incrementos superiores con la mitigación del estrés hídrico (2,41 m de altura y 1,98 cm de diámetro). Se elaboró una propuesta de paquete tecnológico para la programación del riego en plantaciones de *Cedrela odorata* bajo las condiciones del Valle del Yaqui de acuerdo a sus necesidades hídricas.

ÍNDICE

<u>Contenido</u>	<u>Pág.</u>
SÍNTESIS	
Introducción.....	1
Problema científico.....	4
Objeto.....	4
Objetivo general.....	4
Objetivos específicos.....	5
Hipótesis.....	5
Novedad científica.....	5
Aporte teórico.....	5
Aporte práctico.....	5
CAPÍTULO I. CONTEXTO ACTUAL SOBRE MANEJO DE PLANTACIONES FORESTALES COMERCIALES	
1.1 Las plantaciones forestales en el mundo y en México.....	7
1.2 Situación actual del Valle del Yaqui. Experiencias y avances en programas de plantaciones forestales.....	9
1.3 Importancia ecológica del manejo de plantaciones forestales.....	11
1.4 La ecofisiología en árboles forestales. Implicaciones en el manejo.....	13
1.4.1 Los atributos ecofisiológicos.....	13

1.4.2	Herramientas y técnicas para la evaluación fisiológica.....	17
1.5	Características de <i>Cedrela odorata</i>	19
1.5.1	Generalidades sobre el género.....	19
1.5.2	Características botánicas de la especie.....	19
1.5.3	Distribución geográfica de la especie.....	20
1.5.4	Características edafoclimáticas.....	20
1.5.5	Plagas y enfermedades.....	22
1.5.6	Características de la madera.....	23

CAPITULO II. ECONOMÍA HÍDRICA DE *Cedrela odorata* EN UNA ZONA SEMIÁRIDA EN VERTISOL COMPACTADO

2.1	Materiales y métodos.....	24
2.1.1	Ubicación geográfica del área de estudio.....	24
2.1.2	Esquema metodológico para el establecimiento del experimento.....	25
2.1.3	Caracterización climática.....	26
2.1.4	Procedimiento para determinar las propiedades químicas y físicas del suelo.....	27
2.1.5	Determinación de indicadores de calidad de agua.....	28
2.1.6	Variables estudiadas.....	29
2.1.7	Metodología para determinar la contracción y dilatación diurna de la especie <i>Cedrela odorata</i>	30
2.1.8	Metodología para determinar la humedad del suelo.....	31

2.1.9	Metodología para determinar el déficit de presión de vapor (DPV).....	32
2.1.10	Metodología para determinar la evapotranspiración.....	33
2.1.11	Metodología para determinar la lámina de riego.....	33
2.2	Resultados y discusión.....	35
2.2.1	Características químicas y físicas en un vertisol compactado.....	35
2.2.2	Indicadores de calidad del agua utilizada en el riego.....	36
2.2.3	Niveles de contracción y dilatación diurna de <i>Cedrela odorata</i>	37
2.2.4	Medidas de humedad del suelo.....	46
2.2.5	El déficit de presión de vapor. Relaciones con el suelo y la planta.....	53
2.2.6	Evapotranspiración.....	59
2.2.7	Lámina de riego.....	59
2.3	Conclusiones parciales.....	62

CAPÍTULO III. RESPUESTA FISIOLÓGICA DE *Cedrela odorata* ANTE LA MITIGACIÓN DEL ESTRÉS HÍDRICO

3.1	Materiales y métodos.....	62
3.1.1	Procedimiento utilizado para evaluar la respuesta fisiológica de las plantas.....	62
3.1.1.1	Metodología para determinar el potencial hídrico y sus componentes...	62
3.1.1.2	Medidas de intercambio gaseoso.....	65
3.1.1.3	Toma de datos relacionados con el crecimiento de <i>Cedrela odorata</i>	66
3.2	Resultados y discusión.....	67

3.2.1	Comportamiento del potencial hídrico y sus componentes.....	67
3.2.2	Medidas de intercambio gaseoso.....	72
3.2.3	Comportamiento del crecimiento de <i>Cedrela odorata</i>	77
3.2.4	Propuesta de paquete tecnológico para la programación de riego en plantación de <i>Cedrela odorata</i>	80
3.2.5	Valoración económica.....	81
3.3	Conclusiones parciales.....	83
CONCLUSIONES GENERALES.....		84
RECOMENDACIONES.....		85
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		86

INTRODUCCION

En la actualidad está aumentando considerablemente el interés por las plantaciones forestales comerciales, por su potencial para satisfacer la creciente demanda de madera y fibra para uso industrial. Las plantaciones forestales abarcan únicamente el 5 % de la cubierta forestal mundial, proporcionando cerca del 35 % de la madera en rollo en todo el mundo. Se prevé que esta cifra aumentará al 44 % en el 2020 (FAO, 2000).

Según FRA (2000), el desarrollo de las plantaciones forestales está dirigido hacia las zonas ecológicas más apropiadas, si los principios de manejo sostenible del bosque se aplican, las plantaciones forestales pueden proporcionar un sustituto fundamental para el suministro de materia prima que suele provenir de los bosques naturales.

En varios países la producción de madera industrial en las plantaciones forestales ha sustituido de manera significativa al suministro que comúnmente provenía de los recursos forestales naturales. Esta sustitución puede ayudar a reducir la presión sobre los bosques naturales en áreas donde la tala insostenible de madera es la causa principal de la degradación.

La Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable de México, publicada en el Diario Oficial de la Federación en el año 2003, define el término de plantación forestal comercial como el establecimiento, cultivo y manejo de vegetación forestal en terrenos temporalmente forestales o preferentemente forestales, cuyo objetivo principal es la producción de materias primas forestales destinadas a su industrialización y/o comercialización.

El establecimiento de plantaciones forestales comerciales en México, se ha limitado principalmente a la protección de áreas degradadas y pocos son los ejemplos de poblaciones establecidas con fines comerciales. Sin embargo, debe señalarse que en la actualidad muchas industrias y organizaciones ligadas a la actividad forestal, están estableciendo plantaciones para satisfacer parte de sus necesidades en materia prima, ante la inminente escasez y alejamiento de las fuentes productoras de algunas regiones del país, resultando una alta prioridad para el Gobierno Federal de México el Programa de Plantaciones Forestales Comerciales (PRODEPLAN), que puede

constituirse en la base para el aprovechamiento del potencial de las regiones tropicales (Martínez *et al.*, 2006).

En este sentido México cuenta con una de las mayores áreas de plantaciones forestales en la región de América Latina, gracias a sus políticas de incentivos forestales (FAO, 2000).

En casi cuatro millones de hectáreas, de bosques de madera dura, se encuentran especies valiosas como *Swietenia macrophylla* G. y *Cedrela odorata* L., a razón de casi un árbol comercial cada seis a siete hectárea de bosque, es decir, el 4 % del volumen comercial total por hectáreas.

En su hábitat natural éstas especies crecen lentamente, generalmente menos de 1 m³/ha/año; sin embargo, ese ritmo puede duplicarse o triplicarse en los bosques bajo manejo forestal sostenible (Calvo, 2000).

El manejo en las zonas rurales se ha centrado sobre todo en la extracción de resina y uso de leña (INE, SEMARNAT, 2000). La política forestal mexicana responde a la urgencia de impulsar la silvicultura y el aprovechamiento de los recursos forestales, para que contribuyan con bienes y servicios que aseguren el mejoramiento del nivel de vida de los mexicanos, especialmente el de los propietarios y pobladores forestales. Parte de un enfoque que considera que los recursos forestales tienen la capacidad de generar una serie muy amplia de bienes y servicios ambientales, que satisfacen directa e indirectamente necesidades humanas vitales.

La zona semiárida y árida, que se sitúa principalmente en el norte y en el centro de México (los desiertos de Sonora y Chihuahua y el altiplano central), se constituye principalmente de matorrales abiertos, cactus y monocotiledóneas xerofíticas (CONABIO, 1998).

El Valle del Yaqui se encuentra en el sur del Estado de Sonora, México, siendo una de las principales regiones agrícolas donde se originó la llamada revolución verde del Dr. Norman E. Borlaug en 1970. El valle agrícola tiene una extensión aproximada de 450 000 ha con 221 000 ha de agricultura bajo riego por gravedad, de las cuales el 58 % son ejidales y el 42 % de propiedad privada.

La explotación excesiva del Valle del Yaqui, derivada de la actividad agrícola, ha producido una serie de problemas con graves consecuencias medioambientales y de salud en la población, así como el cambio de uso de suelo con disminución de la biodiversidad y una deforestación masiva, produciéndose problemas de erosión, gran aporte de fertilizantes al medio ambiente, salinización del terreno, escurrimiento de fertilizantes en las zonas costeras, disminución de la productividad, afectación a la salud pública y por ende en la calidad de vida.

Actualmente la diversificación productiva del Valle del Yaqui es una de las líneas de acción de los diferentes niveles de gobierno, promoviendo la investigación agropecuaria y la utilización de especies que ofrezcan posibilidades de adaptación con fines productivos.

Desde hace algunos años existe la preocupación por la disminución de las especies preciosas del trópico mexicano, principalmente *Cedrela odorata* L. de la familia meliaceae de gran demanda comercial por sus excelentes características maderables. Las principales causas de su disminución se deben a la sobreexplotación que sobre estas especies se ha hecho, a lo difícil de su regeneración natural y al desconocimiento de su manejo silvícola adecuado (Bertoni, 1978). Por lo anterior, las plantaciones forestales de *Cedrela odorata* L. cobran cada vez mayor importancia, significando una alternativa viable, encaminada a satisfacer la demanda de productos forestales, así como la utilización de tierras ociosas, con poco o reducido valor agrícola.

El establecimiento y manejo adecuado en las plantaciones forestales es necesario, independientemente del objetivo que se persiga con la plantación, siendo de interés el conocimiento de bases ecológicas y funcionales que permitan establecer especies tropicales comerciales como *Cedrela odorata*, considerada la especie preciosa más importante en la industria maderera en México, de gran plasticidad ecológica, además de ser común en la vegetación que surge cuando las comunidades originales han sido destruidas (Pennington y Sarukhán, 1968).

En el Valle del Yaqui las altas temperaturas y el estrés hídrico son factores que pueden llegar a ser limitantes en el crecimiento y desarrollo de las plantas, pudiendo causar daños irreversibles; el conocimiento que se tiene de estos eventos bajo estas

condiciones es poco conocido, debido a la complejidad de su naturaleza (Wang y Huang, 2004). Se sabe que el estrés hídrico ocasiona que las células pierdan su turgencia (Ahmad *et al.*, 1989), por lo que el mantenimiento de un estado hídrico favorable puede llegar a tener efectos positivos para disminuir el estrés provocado por la temperatura alta (Graves *et al.*, 1991).

Villaseñor *et al.* (2009), iniciaron el primer estudio sobre plantaciones forestales en el Valle del Yaqui bajo sistema de riego controlado, con el objetivo de conocer el comportamiento de diferentes especies de interés económico mediante la participación de agricultores cooperantes y un grupo multidisciplinario de investigadores del Instituto Tecnológico de Sonora, financiada por Fundación Produce Sonora A.C. en colaboración con la Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural del Gobierno de la República y la Secretaría de Agricultura del estado de Sonora, demostrándose que la especie *Cedrela odorata* se adapta a las condiciones edafoclimáticas de la región, sin embargo al aumentar las temperaturas en periodos de calor con ausencia de precipitaciones, se presentan situaciones de estrés hídrico que limitan la productividad y establecimiento de plantaciones forestales.

PROBLEMA CIENTÍFICO

¿Cómo establecer plantaciones de *Cedrela odorata* en las condiciones edafoclimáticas extremas del Valle del Yaqui?

OBJETO DE ESTUDIO

El estrés hídrico en plantaciones de *Cedrela odorata* L.

OBJETIVO GENERAL

Determinar las bases ecofisiológicas para manejo del estrés hídrico en plantaciones de *Cedrela odorata* en una zona semiárida del Valle del Yaqui.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar atributos de economía hídrica de la especie en diferentes periodos estacionales.
- Evaluar la respuesta fisiológica de la especie sin estrés hídrico.
- Proponer un paquete tecnológico para la programación de riegos en plantaciones comerciales.

HIPÓTESIS

Si se conoce la demanda hídrica de la especie *Cedrela odorata* en una zona semiárida del Valle del Yaqui Sonora México, en diferentes periodos estacionales, se podrán programar los riegos en función de las variaciones ambientales, reduciendo el estrés hídrico, logrando su establecimiento y una mayor productividad.

NOVEDAD CIENTIFICA

- La determinación de parámetros ecofisiológicos para manejo del estrés hídrico en plantaciones de *Cedrela odorata* en una zona semiárida.
- Definición de umbrales para la mitigación del estrés hídrico de la especie *Cedrela odorata* (dosis y frecuencia de riego).

APORTE TEÓRICO

- Contribución al conocimiento sobre ecofisiología de la especie *Cedrela odorata*.

APORTE PRÁCTICO

- Los productores del Valle del Yaqui contarán con una herramienta que les permita programar los riegos en plantaciones de *Cedrela odorata*.

Para ello, la tesis doctoral se ha estructurado de la siguiente manera:

Introducción

Capítulo I. Contexto actual sobre manejo de plantaciones forestales comerciales.

Capítulo II. Economía hídrica de *Cedrela odorata* en una zona semiárida de suelo vertisol compactado.

Capítulo III. Respuesta fisiológica de *Cedrela odorata* ante la mitigación del estrés hídrico.

Conclusiones parciales

Conclusiones generales

Recomendaciones

Referencias bibliográficas

CAPITULO I. CONTEXTO ACTUAL SOBRE MANEJO DE PLANTACIONES FORESTALES COMERCIALES

1.1 Las plantaciones forestales en el mundo y en México

En los últimos años el sector forestal ha sufrido cambios fundamentales en gran parte como consecuencia de reestructuraciones institucionales en los sistemas de propiedad y del mayor reconocimiento de beneficios múltiples que ofrecen los bosques, se prevé que para el año 2050, el 40 % de los bosques mundiales estarán administrado o serán poseídos por comunidades e individuos (FAO, 2006a).

Según FAO (2009), la situación de los bosques en el mundo se comporta de la siguiente manera: El continente Africano presenta 635 millones de ha de bosques, representando el 21,4 % de su superficie terrestre. África abarca solo el 16 % de la superficie forestal mundial. La región de Asia y el Pacífico posee el 18,6 % de la superficie forestal mundial, repartida en una gran variedad de ecosistemas, como bosques tropicales, bosques templados, manglares costeros, montañas y desiertos. Europa, posee un 17 % de la superficie de tierra global, pero cuenta con una cuarta parte de los recursos forestales mundiales, aproximadamente 1 000 millones de ha, el 81 % de las cuales se encuentran en la Federación de Rusia. La región de América Latina y el Caribe contiene el 22 % de la superficie forestal mundial, el 14 % de la superficie de tierra global. La región de América del Norte, abarca el 17 % de la superficie forestal global (677 millones de ha), aproximadamente una tercera parte del territorio regional cubierto de bosques.

Las plantaciones forestales resultan una alternativa viable con posibilidades de contribuir, en su medida al desarrollo económico de los países, desde una perspectiva técnica, combinando los conocimientos silvícolas, sociales, ecológicos, económicos y financieros. Para OIMT (2006), la demanda creciente de bienes y servicios de la sociedad, así como los de conservación de su ambiente y recursos asociados, ha llevado a la creación de plantaciones forestales para sustituir de manera más cercana sus necesidades, sobre todo de productos industriales. Aunque las plantaciones originalmente fueron encaminadas para sustituir los casos de falla de la regeneración de los bosques naturales y para restaurar algunas áreas afectadas por daños ocasionados por el hombre o accidentes naturales; han crecido como una alternativa

de producción intensiva más controlada en cuanto a la uniformidad de sus productos y la mayor productividad por unidad de superficie.

Las plantaciones forestales se definen como aquellas formaciones forestales sembradas en el contexto de un proceso de reforestación. Estas pueden ser especies introducidas o indígenas que cumplan con los requisitos de una superficie mínima de 0,5 ha; una cubierta de copa de no menos del 10 % de la cubierta de la tierra, y la altura total de los árboles adultos por encima de los 5 m (FAO, 2000).

En muchos países existe una creciente preocupación por incrementar los programas de plantaciones forestales, siendo un elemento a considerar en los instrumentos de la política forestal, de ahí que las experiencias y conocimientos en este sentido contribuyan a formular lineamientos básicos para promover una reforestación exitosa.

IPCC (2007), plantea que las vastas zonas de tierras forestales degradadas en los trópicos proporcionan grandes posibilidades de incrementar el área plantada, con posibles beneficios para el sector de elaboración maderera y oportunidades de capturar los fondos de nuevos mercados de gases de efecto invernadero.

La superficie de plantación forestal mundial alcanza los 140,8 millones de hectáreas, representando un incremento importante. La tendencia con que éstas se han desarrollado ha sido creciente: entre los años 1990 y 2000, el ritmo de crecimiento fue de 2 millones de hectáreas anuales, y de 2,5 millones anuales entre los años 2000 y 2005. Entre 2005 y 2010, la superficie de bosques plantados aumentó 5 millones de hectáreas por año. Tres cuartas partes de todos los bosques plantados están compuestos por especies nativas y un cuarto de especies introducidas (FAO, 2010). Estos resultados evidencian que está aumentando el potencial de las plantaciones forestales para atender parcialmente la demanda sobre los bosques naturales, de madera y fibra para usos industriales.

La superficie de bosques plantados ocupa el 7 % del área total de 264 millones de hectáreas. Dada la tendencia actual, se puede prever que para el año 2020 el área de bosques plantados habrá llegado a ocupar 300 millones de hectáreas (FRA, 2000).

En este contexto, se puede pensar que el futuro desarrollo del sector forestal se sustente en el impulso de las plantaciones forestales y su manejo desde la óptica del

desarrollo sustentable, lo que permitirá identificar estrategias comerciales de productos forestales y garantizar el crecimiento de los mismos.

México, es un país que se ubica en el decimocuarto lugar entre los países del mundo con mayor territorio, ya que cuenta con una extensión territorial de 1 959,248 km². De esta superficie, los bosques y selvas cubren un total de 64,8 millones de hectáreas, para un 13 %, de las cuales el 80 % es propiedad ejidal y comunal, el 15 % privada y el 5 % propiedad de la nación (FAO, 2011). Según el inventario nacional, de la superficie total de bosques del país 21,6 millones de hectáreas tienen potencial comercial, de las cuales se han identificado 10,7 millones de hectáreas con características de clima, suelo y accesibilidad para el establecimiento de plantaciones comerciales (Sánchez *et al.*, 2005).

Una de las estrategias empleadas para reducir la presión que sufren los ecosistemas forestales e incrementar la producción forestal, maderable y no maderable ha sido el establecimiento de plantaciones forestales comerciales. Para ello, se creó en 1997 el Programa de Desarrollo de Plantaciones Forestales Comerciales (PRODEPLAN), cuyo objetivo es apoyar el establecimiento de 875 mil hectáreas de plantaciones forestales comerciales en un plazo no mayor a 25 años, a fin de reducir las importaciones de productos forestales y crear, al mismo tiempo, alternativas de desarrollo sustentable, así como promover la diversificación productiva en el país. El programa está basado en la reconversión al uso forestal de terrenos que alguna vez fueron desmontados con fines agropecuarios. En las plantaciones comerciales de México se cultivan sobre todo árboles para producir madera y celulosa, por lo que se prefieren especies como: *Pinus sp*, *Tectona grandis* L., *Gmelina arbórea* R., *Cedrela odorata* L., *Swietenia macrophylla* G. y *Eucaliptus sp* (SEMARNAT, 2003).

1.2 Situación actual del Valle del Yaqui. Experiencias y avances en programas de plantaciones forestales

La extensión del Valle del Yaqui es aproximadamente de 450 000 ha con 221 000 ha de agricultura bajo riego por gravedad, de las cuales el 58 % son ejidales y el 42 % de propiedad privada. El sector privado está representado por 4,645 propietarios y el

sector social por 19 616 ejidatarios. La actividad agrícola basa su producción principalmente en el cultivo de granos, frutales y hortalizas.

Esta actividad presenta problemas derivados de los altos costos de producción y la tendencia a la baja de los precios de los productos básicos; así como el alto índice de cartera de adeudos bancarios que presenta un gran porcentaje de los productores y la limitante actual del factor agua para los riegos (INEGI, 2000). El sur de Sonora, es el lugar de origen de los trigos semi enanos modernos que ha atraído la atención mundial durante décadas. El 40 % del trigo producido en el mundo en desarrollo proviene de ambientes irrigados como el Valle del Yaqui, y en consecuencia, los resultados de estas investigaciones son de interés en otros lugares fuera de México (Ortíz, 2001).

El Instituto Tecnológico de Sonora, del estado de Sonora México, comenzó a incursionar en programas de plantaciones forestales, contribuyendo a la solución de muchos de los problemas que hoy se presentan en el Valle del Yaqui, aprovechando las experiencias y resultados de los productores agrícolas. En este contexto, se realizó el primer estudio sobre comportamiento de diez especies forestales de interés comercial *Prosopis juliflora* S., *Olneya tesota* G., *Tabebuia impetiginosa* M., *Tabebuia rosea* B., *Cedrela odorata* L., *Khaya senegalensis* J., *Talipariti elatum* Sw., *Dalbergia sissoo* R., *Tectona grandis* L. y *Fraxinus udhei* W., con la finalidad de establecer una metodología para el manejo forestal que asegure una mayor supervivencia y desarrollo de los árboles en la zona agrícola semiárida del Valle del Yaqui. Para dar cumplimiento a estos programas se cultivaron plantas bajo la tecnología de viveros en contenedores, empleando sustratos orgánicos de forma tal que las mismas contarán con la calidad requerida para enfrentar las condiciones de la plantación. También, como parte de las actividades se desarrollaron talleres con productores, encuentros, negociaciones con las autoridades del estado y un foro regional sobre el establecimiento de plantaciones forestales comerciales en zonas áridas y semiáridas con muy buenos resultados.

El comportamiento de las especies cultivadas en la etapa de vivero, para los cuatro meses de vida (abril-julio de 2008), demostró que las condiciones medioambientales del Valle del Yaqui favorecen el crecimiento de estas especies, obteniendo posturas de 40 cm promedio para la mayoría de las especies y 54 cm para *Cedrela odorata*.

Los resultados en el sitio de plantación demostraron que *Talipariti elatum*, *Fraxinus udhei* y *Tectona grandis* tuvieron crecimientos por encima del promedio en condiciones naturales, sobresaliendo también *Cedrela odorata*, lo que representa una alternativa altamente productiva como complemento de la actividad agrícola y la sostenibilidad en el Valle del Yaqui. Se realizaron investigaciones sobre el efecto de las temperaturas promedios en el incremento de altura de las plantas, demostrando el mejor desarrollo entre los meses de julio y agosto, con temperaturas máximas de 42 °C y mínimas de 22 °C. Otra experiencia a destacar de estos estudios, es la presencia de un fenómeno atípico que se presentó en la región en febrero del año 2011, al registrarse una helada tardía con temperaturas mínimas en el sitio Isleta de Hornos de -5 °C y de -2 °C en el Centro Experimental Tecnológico de Sonora (Cett 910) durante seis horas continuas, en tres días consecutivos. En el Cett 910, los individuos de *Cedrela odorata* no sufrieron daños en su sistema foliar a -2 °C, sin embargo en Isleta de Hornos a -5 °C se presentaron daños en los meristemas apicales que afectaron el desarrollo deseado para una plantación forestal comercial (Villaseñor *et al.*, 2010 y 2012).

En relación a los sitios, el mayor incremento se presentó en Isleta de Hornos para *Cedrela odorata* en suelo de aluvión, alcanzando una altura máxima promedio de 3,23 m y diámetro en la base de 7,2 cm en el primer año. Esto obedeció a mejores condiciones de profundidad y textura del suelo (Villaseñor y Cabanillas, 2010).

1.3 Importancia de las plantaciones forestales intensivas

El tema de las plantaciones forestales intensivas ha sido fuertemente discutido en diferentes escenarios a nivel nacional e internacional, sobre todo por los importantes desafíos que se presentan. Sin embargo, existen evidencias de la importancia económica de las mismas y el rol que le corresponde como fuente de servicios ambientales y bienestar para las comunidades por lo que su manejo debe orientarse considerando las funciones que la sociedad demanda.

El fomento de plantaciones forestales permite conseguir una utilización integral y aprovechamiento racional de los recursos naturales: suelo, agua, bosque, recursos humanos y económicos. Según Montagnini (2003), las plantaciones forestales con especies nativas pueden cumplir una función social y económica, suministrando

productos arbóreos con rendimientos relativamente altos (madera, pulpa, leña y otros productos no maderables) y contribuyendo con una serie de servicios ambientales. Para lograr este objetivo, además de la investigación de tipo tradicional sobre nuevas especies y su manejo, es necesario diseñar instrumentos financieros e institucionales novedosos que permitan promover la reforestación de áreas degradadas y el manejo multifuncional de las plantaciones forestales.

El establecimiento de plantaciones forestales no siempre ha logrado los mejores resultados, dado en primer lugar por insuficiencias presentadas desde la selección de las semillas hasta inadecuadas labores en la preparación de los sitios y la no adecuada selección de los suelos según las especies y viceversa, así como la falta de aplicación correcta de los tratamientos. Las plantaciones forestales son criticadas por algunos especialistas, porque consideran que son monocultivos no sostenibles, incapaces de dar los múltiples beneficios que se derivan de los bosques naturales. No obstante, son preferidas por otros, porque pueden satisfacer la demanda de materias primas industriales de usos muy importantes y específicos. Lo cierto es que las plantaciones forestales intensivas, son cada vez más importantes (Álvarez, 2011).

De lo planteado anteriormente, se deriva que existen razones suficientes para justificar un programa de plantaciones forestales intensivas, contribuyendo a la satisfacción de las demandas de madera cada vez más crecientes de la sociedad y a la vez a la restauración de paisajes forestales degradados, conservación de la biodiversidad, el establecimiento de corredores biológicos, conservación de la productividad de los suelos al mantener la fertilidad y estructura de los mismos y protección contra la erosión y desertificación, fenómenos estos que se presentan a menudo a un ritmo acelerado en las zonas áridas.

En varios países la producción de madera industrial en las plantaciones forestales ha sustituido de manera significativa al suministro de la madera que comúnmente provenía de los recursos forestales naturales.

Las plantaciones forestales en Nueva Zelandia suministraron el 99 por ciento de las necesidades nacionales de madera en rollo industrial en 1997; la cifra correspondiente en Chile fue del 84 por ciento, en Brasil del 62 por ciento y en Zambia y Zimbabwe del 50 por ciento (FAO 2000).

Esta sustitución de las plantaciones forestales como fuente de materia prima, puede ayudar a reducir la presión de la tala que se da en los bosques naturales en áreas en donde la tala insostenible de madera es una causa principal de la degradación y en donde las brechas para la corta facilitan el acceso al bosque, facilitando así la deforestación.

El éxito alcanzado por los programas de forestación y el crecimiento de la industria forestal en América Latina ha contado con el desarrollo paralelo de programas tecnológicos intensivos, aumentando la productividad de las plantaciones entre un 20 y 50% y reducir edades históricas de rotación (Rubilar *et al.*, 2008).

1.4 La ecofisiología en árboles forestales. Implicaciones en el manejo

1.4.1 Los atributos ecofisiológicos

La ecofisiología forestal estudia los procesos metabólicos que controlan el crecimiento y desarrollo de los árboles, los cuales, de acuerdo a su potencial genético les permiten su supervivencia y reproducción como especies en ambientes específicos (López, 2005). La misma permite optimizar la producción forestal, de ahí su implicación en el manejo, pues en la medida que se garantice el entendimiento de sus procesos fisiológicos en relación con los factores ambientales y las prácticas silvícolas adecuadas, se podrá controlar la densidad, composición y estructura del bosque.

Las características fisiológicas, morfológicas y etológicas que son adecuadas para que una especie sobreviva bajo las condiciones abióticas o bióticas en que vive resulta un aspecto de interés en los estudios ecofisiológicos (Costas, 2007).

El crecimiento de los árboles, al igual que el de otros organismos está controlado por su potencialidad genética, lo cual se expresa en grado variable de acuerdo a las condiciones ambientales donde se desarrolla. Es decir, la interacción entre la herencia y el ambiente se da a través de procesos fisiológicos que controlan el crecimiento. En el caso de las especies leñosas por su gran tamaño, maduración lenta, larga vida, exposición a variaciones ambientales por años y gran porcentaje de tejido no fotosintético presentan ajustes importantes en su metabolismo (López, 2005).

El agua, es sin duda alguna, el recurso natural más limitante de cualquier ecosistema, especialmente en zonas áridas y semiáridas como es el caso del Valle del Yaqui.

Por ello, la aplicación de diferentes estrategias de riego destinadas a incrementar la eficiencia del uso del agua es uno de los principales retos de la comunidad científica.

Ortíz *et al.* (2010), plantean que un aspecto a considerar a la hora de diseñar cualquier estrategia de riego deficitario está relacionado con la distribución temporal del estrés hídrico y la evolución fisiológica del cultivo, siendo necesario conocer los diferentes umbrales de estrés permisibles y evitar situaciones irreversibles que provoquen daños significativos en la producción forestal.

El clima es determinante para el crecimiento de las plantas y responde a condiciones de circulación atmosférica, temperatura y precipitación de la zona. La interacción de cada uno de estos factores determina una gran variedad de climas y por ende, de especies con distintas posibilidades de desarrollo forestal, sea plantación con fines industriales, sistemas agroforestales para el autoconsumo o para el mercado local (Trujillo, 2005).

La transpiración consiste en la vaporización del agua líquida contenida en los tejidos de la planta y su posterior remoción hacia la atmósfera. Los cultivos pierden agua predominantemente a través de los estomas. Estos, son pequeñas aberturas en la hoja de la planta a través de las cuales difunden los gases y el vapor de agua de la planta hacia la atmósfera (Azcon-Bieto y Talón, 2001).

Para Gispert *et al.* (1983), aparte de la disponibilidad de agua en los horizontes superficiales, la evaporación de un suelo cultivado es determinada principalmente por la fracción de radiación solar que llega a la superficie del suelo. Esta fracción disminuye a lo largo del ciclo del cultivo a medida que el dosel proyecta más sombra sobre el suelo.

La evapotranspiración es la combinación de dos procesos separados por los que el agua se pierde a través de la superficie del suelo, por evaporación y mediante la transpiración del cultivo. La evaporación es el proceso mediante el cual el agua líquida se convierte en vapor de agua y se retira de la superficie evaporante (Taiz y Zeiger, 2006).

En las primeras etapas del cultivo, el agua se pierde principalmente por evaporación directa del suelo, pero con el desarrollo del cultivo y finalmente cuando este cubre totalmente el suelo, la transpiración se convierte en el proceso principal.

La evapotranspiración de referencia (ET_o), se define como la tasa de evapotranspiración de una superficie cultivada de césped verde extensa, de unos 8 a 12 cm de altura, bien desarrollado y uniforme, que cubre totalmente el suelo y tiene un crecimiento activo, estando siempre bien regado (Doorembos y Pruitt, 1977).

La evapotranspiración potencial (ET_p), es el máximo retorno de humedad a la atmósfera ó la evapotranspiración que se produciría si la humedad del suelo y la cobertura vegetal estuvieran en condiciones óptimas (Gispert *et al.*, 1983).

El valor de la evapotranspiración del cultivo (ET_c) no puede superar el valor de la ET_o. Se plantea, que más que la transpiración es interesante conocer la cantidad de agua perdida por una masa vegetal más la evaporación del suelo conocido como evapotranspiración, la cual depende de la radiación, viento y humedad, tipo de suelo y de la vegetación (Gispert *et al.*, 1983).

El coeficiente del cultivo (K_c) se considera a las diferencias del dosel del cultivo y la resistencia aerodinámica con relación al cultivo hipotético de referencia.

El método más utilizado para estimar el consumo de agua por los cultivos o ET_o es el recomendado por Doorembos y Pruit (1977), en el que la ET_o se calcula con el producto de dos términos: $ET_o = ET_c * K_c$, donde K_c es el coeficiente del cultivo y representa la disponibilidad del cultivo y suelo para atender la demanda evaporativa de la atmósfera y depende del cultivo, estado de desarrollo y disponibilidad de agua en el suelo. Los valores de k_c se determinan experimentalmente (Fernández *et al.*, 2001).

La transpiración está regulada por la apertura y cierre de estomas, porque el gradiente de presión de vapor de agua (fuerza motriz de transpiración) es percibido directamente por los estomas. Es decir, la superficie foliar se encuentra acoplada a la atmósfera. El agua en estado líquido es un fluido cuyas moléculas se hallan en constante movimiento. La capacidad de las moléculas de agua para moverse en un sistema particular depende de su energía libre. La magnitud más empleada para expresar y medir el estado de energía libre del agua es el potencial hídrico (Ψ_w) (Azcon-Bieto y Talón, 2001). El potencial hídrico puede expresarse en unidades de energía por unidades de masa o volumen, la unidad de uso más corriente es el megapascal (MPa = 10 bares), aunque en el pasado reciente también se han utilizado la atmósfera y el bar (1 bar= 0,987 atm).

El movimiento del agua en el suelo y en las plantas ocurre de manera espontánea a lo largo de gradientes de energía libre, desde regiones donde el agua es abundante, y por lo tanto tiene alta energía libre por unidad de volumen (mayor Ψ_w), a zonas donde la energía libre del agua es baja (menor Ψ_w). El Ψ_w está fundamentalmente determinado por el efecto osmótico, asociado con la presencia de solutos por las fuerzas mátricas que adsorben o retienen agua en matrices sólidas o coloidales por el efecto de la altura y por presiones positivas o negativas o tensiones presentes en los recipientes o conductos donde se encuentra (Taiz y Zeiger, 2006).

Por otra parte, se ha demostrado que un aumento en el CO_2 por lo menos temporalmente, hace que aumente la tasa de crecimiento en plántulas de árboles forestales, la cual puede alterar los procesos fisiológicos relacionados con la productividad.

Un aumento del CO_2 aumenta la fotosíntesis neta y la eficiencia de uso de agua, aumenta la capacidad fotosintética, altera la distribución de biomasa, la fenología de crecimiento del brote, y disminuye la tolerancia al frío (Johnsen y Major, 2004).

Estos aspectos, permiten fundamentar que los atributos ecofisiológicos resultan parámetros de gran importancia para garantizar un manejo prudente y planificado de los recursos forestales sobre bases científicamente fundamentadas y de esta manera entender mecanismos de adaptación y las variaciones que se presentan en cualquier ambiente, lo cual puede llegar a imponer serias restricciones en el crecimiento y desarrollo de los vegetales y provocar sobre ellos situaciones de estrés. En relación a esto último Pardos (1985), plantea que los procesos fisiológicos normales se desarrollan bajo condiciones ambientales ideales. A causa de la competencia, muchas plantas viven al límite de su capacidad para sobrevivir y superar cualquier evento, lo que provoca situaciones de estrés los cuales pueden diferir en función de los agentes causales. Si éstos son climáticos, resultan como consecuencia de la sequía, el calor, el frío y las heladas. También están definidos otros niveles de estrés por la altitud, la radiación, la sombra y las deficiencias nutricionales.

1.4.2 Herramientas y técnicas para la evaluación fisiológica

Existen diversas herramientas y técnicas disponibles para la evaluación fisiológica, las cuales varían desde aquellas bastantes primitivas a aquellas sumamente sofisticadas y cada una de ellas tiene sus aplicaciones, ventajas y desventajas. A continuación, se describen algunas de las técnicas utilizadas en esta investigación, consideradas de las más avanzadas para la evaluación de parámetros fisiológicos.

El análisis de intercambio gaseoso es una de las técnicas descritas por Taiz y Zeiger (2006) y Azcon-Bieto y Talón (2001), el cual se usa para estimar la fotosíntesis, respiración y transpiración. En las últimas dos décadas, la tecnología de medición del intercambio de gases ha mejorado para aumentar tanto la calidad como la velocidad de las mediciones. En este sentido Escarré (1997), se refiere al tema en cuestión y plantea que el irgaporómetro es uno de los equipos más sofisticados para medir fotosíntesis y transpiración, el cual presenta considerables ventajas respecto a los sistemas tradicionales. Por otra parte, el procesador de información data loggers campbell scientific PC 200 W, es un equipo que permite manejar simultáneamente sensores que recogen datos in situ del estado hídrico de la planta y las variaciones de los factores que lo afectan, ya sean climáticos y de suelo, midiendo y registrando en tiempo real y continuo estos parámetros, los cuales ayudan a manejar de forma óptima el riego. Los datos almacenados y gestionados correctamente permiten crear un historial, registrando todas aquellas incidencias que influyen en la productividad y en la medida de lo posible corregirlas de forma anticipada. Al realizar cualquier modificación de manejo, se pueden comprobar los efectos de manera inmediata. A partir de los valores continuos de diámetro de tallo se han derivado índices que brindan información sobre el estado hídrico de la planta (Goldhamer *et al.*, 1999 y 2001).

La utilización de sensores que miden el estado hídrico del suelo o de la planta permite optimizar la programación de los riegos basada en la estimación de la evapotranspiración máxima del cultivo (ET_c). La mayoría de los sensores utilizados se conocen como tensiómetros, bloques de yeso, sensores de matriz granular y sondas de neutrones. Las variaciones del diámetro de tallo o tronco se miden con sensores de alta resolución que conectados al data logger permiten medidas de las oscilaciones del tallo de forma continua y automática (Medina *et al.*, 2003).

Los dendrómetros son modernos sensores que miden las microvariaciones del diámetro del tronco y tallos de las plantas. El diámetro de estos órganos depende de dos componentes, del propio crecimiento de estos y de la pérdida de agua, existiendo variaciones a lo largo del día, encontrándose cada 24 horas con un máximo y un mínimo de grosor, a esta variación se le llama contracción, y las contracciones anormales indican un estrés del árbol.

Los dendrómetros en relación con los sensores de humedad de suelo pueden evitar que el árbol sufra estrés hídrico por falta de agua y al mismo tiempo no realizar aportes excesivos cuando estos no mejoren el estado hídrico de la planta, debido a que es la propia evolución la que indicará si las contracciones son normales o existen variaciones atípicas.

El valor máximo diario (DTmax) se alcanza en las primeras horas de la mañana (periodo en que la hidratación de los órganos es máxima) y el valor mínimo (DTmin) ocurre en las primeras horas de la tarde, y es proporcional a la máxima pérdida de agua que experimenta la planta por transpiración. La diferencia entre el máximo y mínimo diario se denomina máxima contracción diurna (MCD).

El principio de interpretación de la cámara de presión scholander se basa en la teoría coheso- tenso- transpiratoria, la cual explica el ascenso de agua de la raíz a las hojas. Se sabe que el agua dentro del xilema está bajo tensión debido a la transpiración de las plantas. Esta tensión se debe al déficit de presión de vapor en la atmósfera (DPV). La técnica consiste en medir la tensión generada por el xilema y aplicar una presión generada por aire comprimido o un gas (nitrógeno) para mover las columnas de agua en el xilema (Azcon-Bieto y Talón, 2001).

Las técnicas de programación de riegos permiten calcular cuando regar y que dosis aplicar para maximizar la producción de los cultivos. Existen dos métodos de programación de riego, uno basado en medidas del estado hídrico del suelo o planta, y el otro es el método del balance de agua (Hanson *et al.*, 2000 y Jones, 2004).

1.5 Características de *Cedrela odorata*

1.5.1 Generalidades sobre el género

Cedrela odorata pertenece a la familia Meliaceae, su principal sinónimo es *Cedrela mexicana* M.J. Rohem. Se admite que el cedro de Cuba y las demás Antillas no es *C. mexicana*, como se creía hace poco tiempo. El género *Cedrela* fue establecido por P. Browne en 1756, para el árbol *Cedrela odorata* encontrado en Jamaica, descrito y publicado por Linnaeus (Linneo, 1759; citado por Betancourt, 1999). Desde entonces, 69 especies han sido asignadas a este género por los botánicos. Estas incluyen árboles que crecen en las Américas, India, parte sur oriental de Asia y Australia (Bascopé, 1957), pero las bases de la diferenciación de estas especies no fueron satisfactorias ni dignas de confianza, con el resultado de que en la última revisión del género por Smith en 1960, las especies asiáticas y de australasia fueron separadas y colocadas en el género *Toona*; las especies americanas se redujeron a nueve. Se admite que no todas las especies están bien determinadas sobre la base de un material de herbario adecuado. No se han encontrado evidencias para retener la especie comúnmente llamada *Cedrela mexicana*. Todas las procedencias de las islas del Caribe son consideradas como *Cedrela odorata*. En la región oriental de Cuba existe un taxón con características diferentes a *C. odorata*, el cual ha sido clasificado con el nombre de *Cedrela cubensis* Bisse.

1.5.2 Características botánicas de la especie

Es un árbol que crece hasta 30-40 m en altura y 100-300 cm de d_{1.30}, con fuste cilíndrico. La forma depende de la profundidad del suelo, pues en suelos poco profundos desarrolla un extenso sistema radical superficial y aletones bien desarrollados, mientras que en suelos profundos y fértiles las raíces son profundas y el tronco aflautado. La copa es amplia y rala. Las hojas son alternas, compuestas, paripinnadas, con 5-11 pares de hojuelas, lanceoladas a ovaladas que miden 5-16 cm de largo. Las flores son blanco verdosas, agrupadas en racimos de 30-50 cm al final de las ramas (Cordero *et al.*, 2003).

Las cápsulas son inicialmente verdes y cambian a café oscuro cuando maduran. Son leñosas, redondeadas en ambos extremos y se abren a lo largo en 5 partes, cada una conteniendo 30-40 semillas (Cordero *et al.*, 2003).

Las semillas son planas, ovoides, con un ala y miden 5-6 mm (18-20 mm incluyendo el ala). Se reconoce bien al machacar las hojas entre las manos pues dejan un cierto olor a ajo (mucho más fuerte durante la fase de máxima floración). También por la corteza de los adultos, muy fisurada a lo largo (Cordero *et al.*, 2003).

1.5.3 Distribución geográfica de la especie

La especie se encuentra distribuida en las zonas de vida bosque húmedo tropical, bosque húmedo subtropical y bosque seco tropical. Es una especie exigente a la luz. De forma natural se encuentra desde México a Bolivia y norte de Argentina, y en el Caribe. Debido a su amplia distribución en América tropical forma parte de la flora nativa de la mayoría de países latinoamericanos, a excepción de Chile. El límite septentrional del área de distribución de este género está situado, aproximadamente en los 24°N en México; y el meridional, según Buchinger y Falcone (1957), citados por Betancourt (1987), en los 27°S, en la provincia de Misiones, Argentina.

En México se encuentra desde el sur de Tampico hasta la península de Yucatán inclusive, en la vertiente del Golfo, y desde Sinaloa hasta Guerrero en la del Pacífico. Es probable que esta especie también forme parte de la flora de América Central y del norte de América del Sur, pero no existe información fidedigna acerca de esta posibilidad (Paladinez, 2011).

1.5.4 Características edafoclimáticas

Las temperaturas medias anuales registradas en las regiones donde *Cedrela odorata* crece naturalmente en Cuba oscilan entre los 21 °C y 26 °C, aunque tolera temperaturas de máximas absolutas superiores a 36 °C y mínimas absolutas por debajo de 5 °C (Betancourt, 1999).

Por otra parte, Villaseñor *et al.* (2010), reportaron temperaturas por encima de 40 °C y por debajo de 0 °C (-2 °C y -5 °C), evidenciándose una amplitud ecológica considerable para la especie con respecto al macro clima, siendo una contribución a las características climáticas de la especie en estudio.

Bascopé (1957), opinan que la especie requiere para su buen desarrollo precipitaciones anuales que oscilen entre 1 200 mm y 2 000 mm, con una estación seca de 3 a 4 meses. Herrera y Lanuza (1997), afirman que en áreas de precipitación de 3 000 mm, el cedro está en su límite extremo de su distribución natural y por lo tanto su establecimiento ofrece mayores dificultades en estas regiones que en las de solo 2 000 mm a 2 250 mm anuales, plantean que alcanza sus máximos tamaños e incrementos en zonas con precipitaciones entre 2 500 mm y 4 000 mm anuales.

Es una especie que requiere para su buen desarrollo un suelo fértil y con buen drenaje. Parece que la materia orgánica y la cal juegan un papel importante en el comportamiento de los árboles. En los suelos profundos, fértiles y de topografía alomada, cuyas características texturales permiten buena aireación y movimiento del agua freática se observan comúnmente, árboles bien desarrollados. Posee una amplitud ecológica considerable con respecto al microclima y tipos de suelo, como lo comprueba su extensa área de repartición natural, que comprende condiciones ambientales bastante variadas. Sin embargo no ocurre uniformemente dentro de dicha área en toda su extensión; lo cual indica que existe un microambiente bien definido, o sea, una determinada combinación de ciertos factores ambientales presentes virtualmente dondequiera dentro del área de repartición natural, pero que en forma efectiva se realiza solo en raras oportunidades (Betancourt, 1999).

Prefiere suelos más bien livianos, suficientemente aireados y drenados, y falta por completo en las partes pantanosas. Se observa a menudo que crece con preferencia en los cerros y lomas, en fin, sobre cualquier elevación del terreno aunque sea mínima y, en general, en lugares con buen drenaje superficial (Betancourt, 1999). Este mismo autor plantea que los requisitos fundamentales de la especie, son la saturación hídrica y un abundante suministro de elementos nutritivos.

1.5.5 Plagas y enfermedades

El ataque por el barrenador *Hypsipyla grandella* Z., es un problema muy serio en el vivero y en plantaciones. El problema es más severo en periodo lluvioso. También es posible reducir el ataque mediante la plantación mezclada con otras especies. En Cuba se ha experimentado mezclando *Datura* sp. (Reina de la noche) en las plantaciones de cedro. El aroma de estas flores dificulta a las hembras encontrar los árboles de cedro. Un método de control más habitual es el uso de insecticida (pero generalmente es inefectivo). En mezcla con café provee un buen ambiente para el crecimiento de *Cedrela odorata*, siendo menor el ataque cuando los árboles son plantados entre las hileras de café y no dentro. También es menor cuando son plantados en cafetales maduros que en los recién plantados o podados. Es importante un manejo cuidadoso dirigido a mantener el máximo vigor durante la época inicial (Cordero *et al.*, 2003).

El árbol es más susceptible en los dos o tres primeros años, principalmente porque en árboles de más edad y con más follaje, el ataque se diluye entre muchos otros posibles sitios de oviposición, y no tanto en el eje principal. El INIFAP (1998), recomienda que debe prevenirse y combatir las plagas como el barrenador, utilizando control biológico con *Beauveria bassiana* y *Bacillus thuringiensis*. *Beauveria bassiana*, es un hongo que infecta a las larvas del barrenador de brotes por contacto de las esporas, mientras que la bacteria *Bacillus thuringiensis*, lo hace por ingestión. Se recomiendan aplicaciones mensuales usando ambos controles. Estos insecticidas tienen un efecto importante sobre el barrenador de yema del cedro, reduciendo el efecto de la misma entre un 70 y 90 %.

Bruner *et al.* (1975), mencionan como plagas del cedro a los insectos: *Coelocara ernestii* Schwarz, pulgón saltador del cedro; *Dikraneura cedrelae* Oman., saltahoja; *Cryptorhynchus* sp. (sensu lat.), picudo; *Phyllocnistis* sp., minador serpentino de las hojas y *Leucophoberton argentiflua* (Hbn.), gusano de las hojas del cedro. También reportan dañando la madera de esta especie a: *Cryptotermes brevis* (Walker), comején que ataca la albura; *Kaloterms snyderi* Light, comején; *Neotermes castaneus* (Burm.), comején y los taladradores de la madera *Lyctus villousus* Lesne y *Minthea obsita* Woll.

Recientemente se han detectado ataques de *Phyllophaga* sp. (gallina ciega), muy común en cultivos de hortalizas. En este sentido, se presentaron daños en árboles de dos años en la zona agrícola del Valle del Yaqui, causando lesión en las raíces y marchitez repentina, moviéndose de una planta a otra.

La especie es afectada por otras enfermedades de menor importancia, tales como la producida por *Phyllachora balansae* Speg., que daña las posturas en los semilleros y en ocasiones las posturas de algunos árboles; la mancha de las hojas cuyo agente patógeno es *Cercospora* sp., frecuentemente asociado con *Phyllachora balansae* Speg (Roig, 1965).

1.5.6 Características de la madera

La albura es de color pardo amarillento y el duramen beige rosado a pardo rojizo. Es decorativa, de superficie brillante, olor aromático y sabor amargo (González, 1991).

En condición seca al aire, presenta una coloración naranja-grisáceo. El grano es recto, textura media y lustre alto (Aguilar, *et al.*, 1992).

Los radios son de tipo homogéneo y heterogéneo. Las fibras son de tamaño mediano, ventriformes y algunas fibras septadas de dos a tres septos por fibra. La madera se clasifica como moderadamente pesada, con un peso específico básico promedio de 0,43. La madera tiene una densidad de media a alta: 0,33-0,60. Madera moderadamente liviana a moderadamente pesada, peso específico 0,40–0,50 gr/cm³ (Aguilar, 1992) de 0,36 – 0,65 (Aguilar, 1966) y 0,43 (Carpio, 1992 y 2002). Su peso verde promedio es de 620 kg/m³ con 74 % de humedad. Blanda pero firme, elástica (Aguilar, 1992). Las propiedades mecánicas se clasifican de muy bajas a bajas, clasificándose como madera estructural del grupo C (Herrera y Lazuna, 1997). La albura es fácil de preservar. Resistente a las termitas pero no a barrenadores marinos. Fácil de secar, con velocidad moderada (16 día al aire hasta tasa inferior al 20 %) y ligeros defectos como arqueaduras y torceduras. Fácil de trabajar con maquinaria y herramientas manuales (Cordero *et al.*, 2003).

CAPITULO II. ECONOMÍA HÍDRICA DE *Cedrela odorata* EN UNA ZONA SEMIÁRIDA DE SUELO VERTISOL COMPACTADO

2.1 Materiales y métodos

2.1.1 Ubicación geográfica del área de estudio

La investigación se realizó en una plantación de *Cedrela odorata* en el Valle del Yaqui Block 910, perteneciente al Centro Experimental de Transferencia de Tecnología del Instituto Tecnológico de Sonora, ubicada al sur del estado de Sonora, México, entre la Sierra Madre Occidental y el Mar de Cortés, limitando al norte con Ciudad Obregón y al sur con el Valle del río Mayo; entre los paralelos 27°10' y 27°50' latitud norte, y los meridianos 109°55' y 110°36'. El área experimental fue georeferenciada mediante Sistema de Posicionamiento Global (GPS) Global Sat (figura 1).

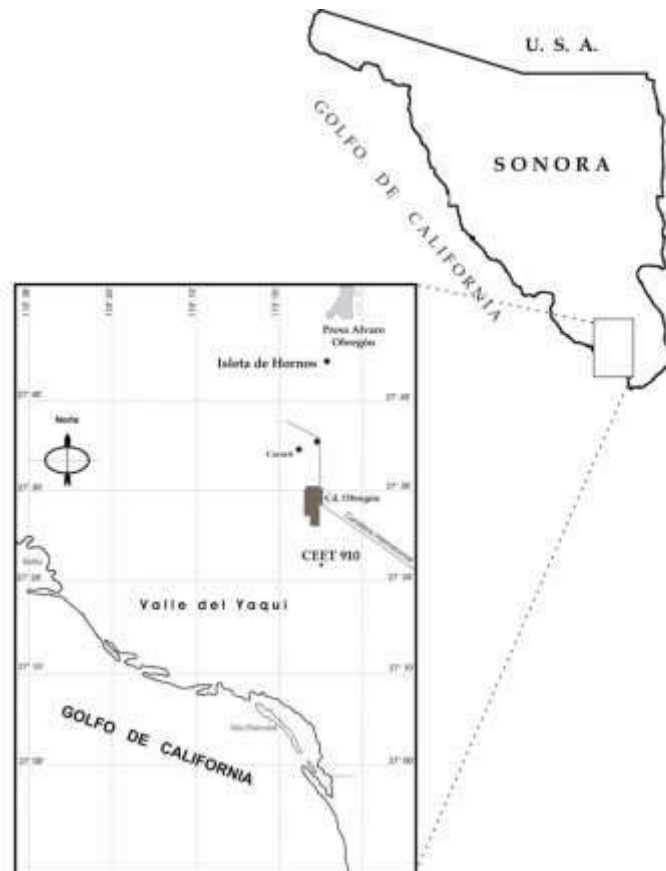


Figura 1. Ubicación geográfica del área experimental.

2.1.2 Esquema metodológico para el establecimiento del experimento

En la figura 2 se observa el esquema metodológico empleado para el establecimiento del experimento. Para ello se estableció una plantación comercial de 49 árboles de *Cedrela odorata* a un marco de plantación de 3 x 3 m, en un suelo vertisol compactado, a partir de plántulas obtenidas en vivero de contenedores rígidos de tubetes con mezcla de sustratos (peatmoss, agrolita, vermiculita, osmocote). La preparación del terreno se realizó con sistema de tracción con cincel de 1 m de profundidad y la preparación del suelo con rastra de disco de tracción.

Se instaló un sistema de riego por goteo para abastecer el área experimental, de forma tal que se garantizó la misma presión para todos los árboles. Cada árbol contenía dos goteros de 4 litros/hora, recibiendo cada uno un total de 8 litros/hora. Además se instaló un centro procesador de información mediante un Data Logger Campbell Scientific y Multiplexor y se colocaron sensores remotos de humedad del suelo y dendrómetros.

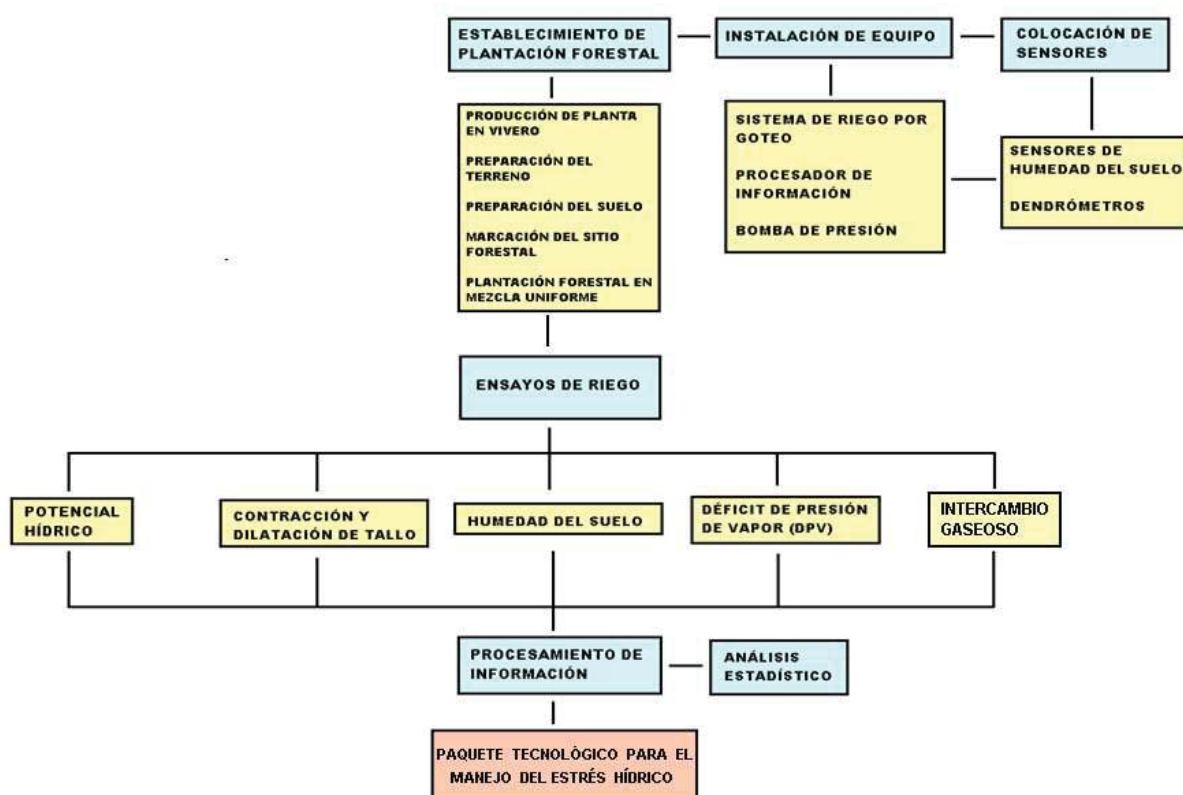


Figura 2. Esquema metodológico para el experimento.

2.1.3 Caracterización climática

Se obtuvieron datos climáticos del área de estudio a través de la Red estatal de estaciones meteorológicas mediante el Sistema de Información Agroclimática Agroson (2010). La estación seleccionada fue el Block 910 CIANO, ubicada en el Valle del Yaqui dentro de la misma área de investigación.

Los datos climáticos se registraron diariamente a partir del momento en que fueron tomadas las lecturas de los sensores obteniendo información sobre temperatura promedio (TP), temperatura máxima (TMAX), temperatura mínima (TMIN), humedad relativa promedio (HRP), humedad relativa máxima (HRMAX), humedad relativa mínima (HRMIN) y lluvia (LL). En la figura 3, se muestran las temperaturas históricas promedio en el Valle del Yaqui comprendidas entre el periodo de 1957/2011 y en la figura 4 se precisa sobre estas mismas variables climáticas pero para el periodo en el cual se desarrolló la investigación (2009/2011); apreciando fluctuaciones entre los valores máximos y mínimos de temperatura promedio. Es importante resaltar que las temperaturas registradas durante el día superan en algunos casos los 41 °C, al igual que las mínimas, registrando hasta -2 °C en febrero del 2011.

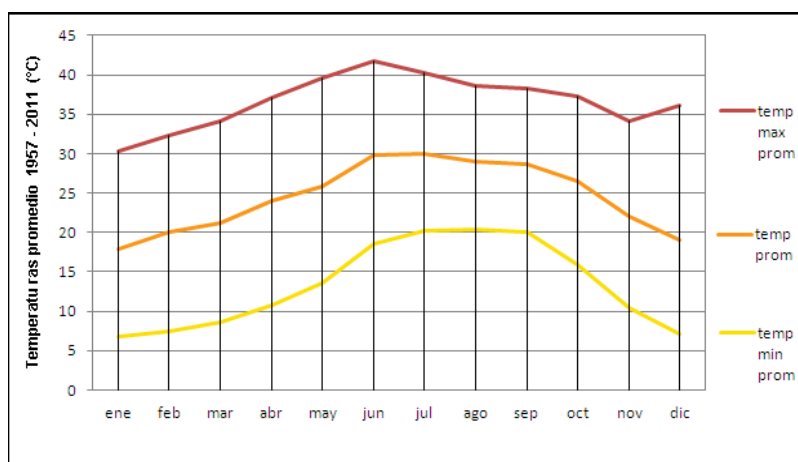


Figura 3. Temperaturas máximas, mínimas y promedio históricas en el Valle del Yaqui durante 1957/2011.

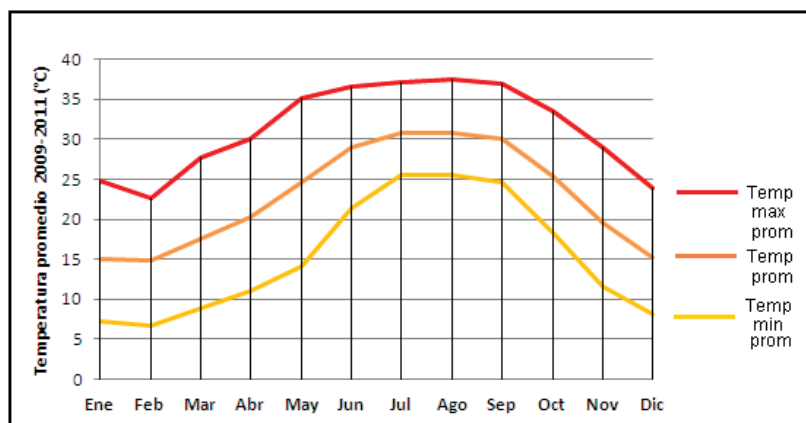


Figura 4. Temperaturas máximas, mínimas y promedio históricas en el CETT 910 durante 2009/2011.

2.1.4 Procedimiento para determinar las propiedades químicas y físicas del suelo

Se determinaron las propiedades químicas y físicas del suelo de la parcela experimental del CETT 910. Para ello se tomaron dos muestras de suelo al azar a una profundidad de 20 y 40 cm, las cuales fueron analizadas en el laboratorio de suelos del Instituto Tecnológico de Sonora del estado de Sonora, México según metodología establecida por la norma oficial mexicana-021 (SEMARNAT, 2000).

- Conductividad eléctrica o conductancia específica (CE)

Se realizó a través del método de Puente Wheatstone con un conductímetro por extracto de saturación en filtración al vacío de una pasta de suelo saturada con agua destilada, evaluando la concentración salina del suelo.

- pH

Se basó en la determinación de la actividad del ion H^+ por el método potenciométrico, utilizando un potenciómetro Corning Pinnacle 545.

- Cationes solubles (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+)

Se determinaron las proporciones de Ca^{2+} y Mg^{2+} mediante absorción atómica, con titulación de EDTA. Para el Na^+ y K^+ se utilizó un espectrofotómetro de emisión atómica o flamómetro en extractos diluidos.

- Materia orgánica (MO)

Se determinó mediante el método de Walkley Black, basado en la oxidación del carbono obtenido en la materia orgánica, por el oxígeno atómico generado por la reacción entre el H_2SO_4 y el dicromato de potasio ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$).

- Aniones (HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , P_2O_5 , NO_3^-)

Se determinaron por valoración volumétrica, utilizando materiales comunes de laboratorio, agitador electromagnético y fotocolorímetro.

- Textura

La textura del suelo se determinó separando agregados de materia orgánica y floculación, analizando las partículas de arenas, limo y arcilla, a través del hidrómetro de Bouyoucus.

Sobre la base de estas características se decidió mejorar la textura del suelo vertisol compactado por la actividad agrícola, mejorando la permeabilidad, rastreo y subsoleo de tracción a 1 m de profundidad. Se incorporaron nutrientes a una fórmula de N20-P20-K20. Para el caso de los contenidos de materia orgánica se adicionaron materiales húmicos al suelo en proporción de 1 kg por planta y descompactadores de suelo para facilitar la infiltración.

2.1.5 Determinación de indicadores de calidad de agua

Para determinar los indicadores de calidad del agua se analizaron las dos fuentes de agua de riego utilizadas en la parcela del CETT 910, expresadas en mg/L, a partir de los métodos estandarizados de la American Public Health Association (APHA), American Water Works Association y Water Pollution Control Federation (WPCF). Las muestras se analizaron en el laboratorio de química del Instituto Tecnológico de Sonora, realizando las siguientes determinaciones según las normas Mexicana AA-093 (SCFI, 2000), Mexicana AA-073 (SCFI, 2001), Mexicana AA-074 (SCFI, 1981) y Mexicana AA-008 (SCFI, 2000):

- pH

A través del método potenciométrico, utilizando un potenciómetro Corning Pinnacle 545.

- Conductividad eléctrica (CE)

Para ello se utilizó un conductímetro marca YSI Modelo 31.

- Calcio (Ca^{2+})

Se determinó por volumetría, utilizando EDTA como titulante.

- Magnesio (Mg^{2+})

Se determinó por volumetría, utilizando EDTA como titulante.

- Sodio (Na^+)

La determinación se llevó a cabo mediante un espectrofotómetro de flama digital, marca Cole-Parmer modelo 2655-00.

- Potasio (K^+)

La determinación se realizó mediante un espectrofotómetro de flama digital, marca Cole-Parmer modelo 2655-00.

- Carbonato y Bicarbonato (CO_3^{2-} y HCO_3^-)

La determinación de carbonatos y bicarbonatos se realizó por volumetría, utilizando ácido clorhídrico como titulante.

- Sulfatos (SO_4^{2-})

La determinación de sulfatos se llevó a cabo por volumetría precipitando el sulfato con solución de cloruro de bario.

- Cloruros (Cl^-)

Se realizó por método volumétrico, utilizando nitrato de plata como titulante.

2.1.6 Variables estudiadas

Para el estudio de la economía hídrica de la especie se identificaron las siguientes variables:

Variable independiente

Dosis y frecuencias de riego, subdividas en cuatro niveles según las necesidades hídricas de la especie:

- Nivel 1: 96 litros de agua cada diez días (junio 2010)
- Nivel 2: 192 litros de agua cada diez días (julio 2010)
- Nivel 3: 192 litros de agua cada siete días (agosto, octubre y noviembre 2010)
- Nivel 4: 192 litros de agua cada tres días (agosto 2011)

Variables dependientes

Contracción y dilatación del tallo.

Humedad del suelo.

Déficit de presión de vapor (DPV).

Evapotranspiración.

2.1.7 Metodología para determinar la contracción y dilatación diurna de la especie *Cedrela odorata*

La contracción y dilatación del tallo se determinó para cada uno de los cuatro niveles experimentales que responden a diferentes dosis y frecuencias de riego, atendiendo a las necesidades hídricas de la especie en los diferentes periodos estacionales, desde verano hasta invierno, iniciándose en junio del año 2010 y finalizando en agosto del 2011.

Para medir la contracción y dilatación máxima del día y la noche se colocaron cinco dendrómetros Ecomatik (DD-S) de fabricación alemana que proporcionan datos de manera permanente, conectados por cables, los cuales fueron alimentados por corriente eléctrica de 110 watts. Se registraron lecturas cada 10 segundos, promediando el total cada 30 minutos para obtener datos durante las 24 horas. El Data Logger contiene un software el cual se instaló a una Pc que se encuentra de manera permanente en el centro procesador de información.

Se realizó un análisis de varianza de clasificación simple y prueba de comparación de medias de Tukey con un 95 % de confiabilidad para la variación entre la máxima contracción y dilatación por dosis y frecuencia de riego.

2.1.8 Metodología para determinar la humedad del suelo

En el área de estudio se instalaron nueve sensores marca watermark (figura 5 y 6) para monitorear la humedad del suelo, de los cuales se tomaron cinco sensores para el estudio. Se colocaron a 1 m de profundidad y a 20 cm de distancia del árbol y de la fuente de abastecimiento de agua propia del sistema de riego por goteo. Las lecturas fueron dadas en centibares (cB) y se tomaron de manera permanente. Los sensores marca watermark miden la fuerza a la cual están sometidas las plantas para extraer agua del suelo, contienen arena silíceo y electrodos dentro de una malla de acero inoxidable, asegurando el contacto permanente de las arenas con el complejo del suelo. De acuerdo a la textura del suelo las lecturas corresponden al siguiente estado de humedad (tabla 1), según Urzainqui (2010).

Tabla 1. Interpretación de las lecturas de los sensores marca watermark

Lectura en centibares	Estado de la humedad en el suelo
0-10	Suelo saturado
10-30	Suelo con suficiente humedad, excepto suelos de arena gruesa que empiezan a secarse
30-60	Margen para iniciar el riego excepto en suelos muy arcillosos
60-80	Margen para iniciar el riego en los suelos muy arcillosos
Mayor de 80	El suelo se está secando peligrosamente



Figura 5. Imagen del sensor watermark



Figura 6. Instalación del sensor watermark

2.1.9 Metodología para determinar el déficit de presión de vapor (DPV)

El déficit de presión de vapor (DPV) se determinó considerando la diferencia entre la presión de saturación de vapor (e_s) y la presión real de vapor (e_a), a partir del cálculo de los valores de porcentaje de humedad relativa y temperatura promedio como se expresa en las siguientes fórmulas:

$$e^o(T_{\min}) = 0.6108 * \exp\left[\frac{17.27 * T_{\min}}{T_{\min} + 237.3}\right] \quad e^o(T_{\max}) = 0.6108 * \exp\left[\frac{17.27 * T_{\max}}{T_{\max} + 237.3}\right]$$

$$e_s = \frac{e^o(T_{\max}) + e^o(T_{\min})}{2} \quad e_a = e_s (HR_{\text{media}}) / 100$$

Donde:

e_s = Presión media de vapor de saturación (KPa)

e^o = Presión de vapor a temperatura

T_{\max} = Temperatura máxima

T_{\min} = Temperatura mínima

HR = Humedad relativa

DPV = Déficit de presión de vapor (KPa)

Los valores de humedad relativa y temperaturas máximas y mínimas se obtuvieron del Sistema de información agroclimática (Agroson, 2010). Posteriormente se determinaron los valores de e_s y e^o a través de lecturas cada una hora y finalmente se determinó el DPV para todos los meses. Estos resultados fueron relacionados con los datos funcionales obtenidos de los sensores de la planta y del suelo.

Se realizó un análisis de correlación no paramétrico de Spearman al 99% de confiabilidad con los datos obtenidos del año 2010 asociadas a la economía hídrica de la planta (DPV, temperatura y humedad del suelo).

Se utilizó una regresión simple, utilizando como variable independiente o predictora la presión de humedad del suelo y como variable respuesta o dependiente la variación medida entre la máxima contracción y dilatación del tallo.

2.1.10 Metodología para determinar la evapotranspiración

La evapotranspiración se determinó mediante la ecuación de Penman-Monteith propuesta por FAO (2006b). A partir de la definición de evapotranspiración de referencia (ET_o), se determina el coeficiente del cultivo (K_c) relacionando la evapotranspiración medida del cultivo (ET_c) con la ET_o calculada, es decir:

$$ET_o = ET_c * K_c$$

$$K_c = ET_c / ET_o$$

El coeficiente (K_c) depende del tipo de cultivo y su fase de desarrollo. En este caso se tomó como referencia el K_c anual del cultivo en árboles frutales en condiciones semiáridas con un valor de 0,70, según FAO (2006b), el cual representa un dato muy cercano debido a que toma como referencia al cultivo de cítricos en la zona agrícola del Valle del Yaqui, los cuales demandan cantidades de agua muy cercanas a las estimadas en el experimento. La evapotranspiración de referencia (ET_o) anual en las condiciones de suelo vertisol compactado del Valle del Yaqui es de 1 887 mm (5,17 mm/día X 365), de acuerdo a los datos obtenidos de la estación meteorológica Block 910 CIANO (Agroson, 2010).

2.1.11 Metodología para determinar la lámina de riego

La lámina de riego es la cantidad de agua que se aplica a un suelo para satisfacer las necesidades hídricas de los cultivos (De la Peña *et al.*, 2001). Esta lámina de agua debe ser únicamente la necesaria para alcanzar “la capacidad de campo”, por lo que no debe sobrepasar dicho límite para no correr el riesgo de desperdiciar agua. Por el contrario, tampoco debe regarse con un volumen menor al requerido, dado que pueden marchitarse las plantas por falta de humedad antes de que se aplique el próximo riego.

La lámina de agua se determinó a partir de la fórmula propuesta por De la Peña *et al.* (2001):

$$P_v = Lam (LR) = P_s \times D_a \times profundidad (pr)$$

Donde:

Pv = Porciento de volumen de agua

Lam (LR) = Lámina de agua en cm

Ps = Porciento de contenido de humedad gravimétrica del suelo

Da = Densidad aparente en gr/cm³

pr = Profundidad radicular en cm

Así la lámina de agua almacenada en el suelo en un momento dado es igual al porciento de humedad gravimétrica del suelo (Ps) por la profundidad radicular (pr) y por la Densidad aparente (Da). Se calculó la lámina de agua que está almacenada en un espesor de suelo de 1 m después de haberse determinado la humedad existente con un valor de Ps = 20 %, con un valor de densidad aparente de 1,3 gr/cm³ en suelo barrial compactado, a través de la fórmula propuesta por (De la Peña *et al.*, 2001):

$$Lam = \frac{Ps}{100} \times Pr \times Da$$

Comparado con los volúmenes de agua por aniego y considerando que en el caso de los sistemas de riego por goteo el volumen disminuye debido a que la cantidad de agua se destina en forma localizada a una planta en específico disminuyendo el total de volumen/ha se aplicó la siguiente fórmula:

$$L = \frac{V}{A} = \frac{m^3}{m^2}$$

Donde:

L = Lámina de riego

V = Volumen de agua

A = Área

2.2 Resultados y discusión

2.2.1 Características químicas y físicas del suelo vertisol compactado

La base de una producción forestal científicamente orientada, descansa entre otros factores, en el conocimiento que se tenga de los suelos y en consecuencia la forma en que se oriente su manejo.

La interpretación de los análisis físico-químico de los suelos resultan de primordial importancia para determinar el estado en que se encuentran, los factores que limitan su productividad y los elementos que degradan la calidad de ellos (Martín, 2000). En la tabla 2, se muestran las propiedades químicas del suelo en estudio, determinando que son pobres, con bajos contenidos de materia orgánica, niveles medios de bases intercambiables y pH básico. Estos resultados se corresponden con los obtenidos por Ochoa *et al.*, (2011).

La materia orgánica es uno de los constituyentes esenciales del suelo. Martín (2000), refiere que en los países tropicales con altas temperaturas, los porcentajes de materia orgánica tienden a ser menores de 3 %, debido a su rápida descomposición. El porcentaje de materia orgánica para este estudio se encuentra por debajo de estos valores (1,22 %). Betancourt (1999), manifiesta que la especie *Cedrela odorata* requiere de suelos de buena fertilidad para su desarrollo, sin embargo esto no se corresponde con los valores obtenidos en el análisis químico.

Por otra parte Roig (1965), plantea que la acidez o pH de los suelos por encima de 7 no es un factor decisivo en el desarrollo de esta especie, aunque valores por debajo pudieran afectar la presencia de hongos y bacterias favorables en *Cedrela odorata*. Los resultados obtenidos en cuanto pH se encuentran en valores medios de 8,05 y 8,27 para la primera y segunda profundidad respectivamente y al parecer no resulta una limitante para la especie.

Tabla 2. Propiedades químicas del suelo vertisol compactado del CETT 910.

Profundidad (cm)	pH	mmhos/cm		(.....meq/100g.....)						(.....mg/kg.....)			
		CE	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	N-NO ₃	P ₂ O ₅	MO
0-20	8,05	0,90	1,00	0,75	9,70	0,10	-	5,00	0,25	1,75	126,73	10,79	1,22
20-40	8,27	1,00	1,25	1,25	5,70	0,20	-	4,80	1,50	2,50	-	7,68	-

Los suelos vertisoles generalmente presentan problemas de textura, compactación y drenaje, los cuales ocasionan encharcamientos, pudriciones y problemas de riego. También con frecuencia presentan problemas de salinidad, por lo que puede inhibirse el intercambio osmótico entre el suelo y la planta, y se secuestran o inmovilizan nutrientes, tanto aplicados como los de liberación natural. Taiz y Zeiger (2006), plantean que los suelos arcillosos presentan una gran capacidad de campo y días después de la saturación aún pueden retener un 40 % del agua en volumen.

Las propiedades físicas del suelo constituyen un indicador importante para caracterizar un edafotopo y así la autoecología de determinada especie. En la tabla 3, se muestra la textura del suelo del CETT 910 en las dos profundidades, indicando un mayor porcentaje de arcilla y menor contenido de limo. Estos resultados coinciden con lo reportado por Ochoa *et al.* (2011), en suelo vertisol compactado en el sur de Sonora, México. También Ramírez (2009), obtiene resultados similares y se refiere a las consecuencias del mismo para el desarrollo de las plantas.

Tabla 3. Textura del suelo vertisol compactado del CETT 910

Muestra	Arena (%)	Arcilla (%)	Limo (%)
1	21,96	60,04	18
2	20,96	50,98	19,36

2.2.2 Indicadores de calidad del agua utilizada en el riego

En la tabla 4, se presentan los indicadores de calidad del agua utilizada para riego en el ensayo experimental.

Tabla 4. Indicadores de calidad del agua utilizada en el ensayo experimental.

Muestra	pH	μmhos/cm		(.....mg/L						
		CE	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻
Agua de riego	8,16	350	4,00	1,20	87,40	-	-	30,50	64,20	51,40
Agua de pozo	8,07	948	99,20	24,9	71,30	3,90	-	444,2	9,30	98,80

Los resultados que se muestran en la tabla anterior indican que el pH del agua de riego de las dos fuentes disponibles (agua de riego y de pozo) se encuentra en valores superiores a 8, considerados como alcalinos. Por lo que bajo estas condiciones es de esperarse que con el tiempo estos suelos sufrirán un proceso de alcalinización, provocando problemas de precipitación de calcio y magnesio y por otro lado afectan la disponibilidad de algunos nutrientes (principalmente metales pesados).

De acuerdo a la clasificación propuesta por el laboratorio de salinidad de los Estados Unidos (APHA, AWWA, WPCF, 1992) el agua de riego derivada de la presa del Río Yaqui está considerada de segunda clase, con una conductividad eléctrica de 350 $\mu\text{mho/cm}$. Las aguas de esta categoría deben aplicarse con un manejo adecuado ya que pueden ocasionar problemas de salinidad en el suelo, de ahí que se prefiere aplicar en los suelos de buen drenaje.

Para el caso del agua del pozo se reporta una conductividad eléctrica de 948 $\mu\text{mho/cm}$, la cual se clasifica de tercera clase por su contenido de sales.

Considerando que estos cationes se encuentran en valores normales para el agua de pozo, se puede decir que no implica ningún riesgo su empleo. En cambio, para el agua de la presa los valores son inferiores, por lo tanto se considera como agua media. Por su parte Ortiz (2003), coincide con estos criterios y refiere que el agua de riego se considera un factor limitante en la producción, pues depende de la disponibilidad en las presas de la región, aunque cuenta con información detallada sobre el uso y manejo del agua para suelos vertisol compactado.

2.2.3 Niveles de contracción y dilatación diurna de *Cedrela odorata*

En el sector forestal los dendrómetros se utilizan para medir las variaciones en el tallo y las raíces, compuesto de ritmos de agotamiento y almacenamiento de agua y reposición. Los análisis detallados en los patrones diarios de variación en la contracción y dilatación del tallo permiten entender la dinámica de crecimiento de los árboles (Deslauriers *et al.*, 2007 a y b; Giovannelli *et al.*, 2007; Drew *et al.*, 2008, 2009 a y b; Turcotte *et al.*, 2009).

En la figura 7, se muestran los niveles medios de contracción y dilatación del tallo en los árboles seleccionados del primer ensayo (dosis y frecuencia de 96 litros de agua cada diez días).

En la misma, se aprecia que los dendrómetros registran variaciones diarias en la contracción y dilatación del tallo, además se presentan diferencias entre el valor mínimo de contracción y el máximo de dilatación del tallo, oscilando entre 200 y 500 μm de máxima contracción diurna con una tendencia descendente, lo cual indica situaciones de déficit hídrico en los árboles, representado en las lecturas de los dendrómetros comprendidas hasta el 30 de junio del 2010 correspondiente al verano, con temperaturas máximas registradas de 41,6 °C y mínimas de 25,6 °C y sin precipitaciones. Fereres *et al.* (1999), refieren que en los estudios de contracción y dilatación del tallo el movimiento ascendente del agua es en gran medida durante el día cuando los estomas están abiertos, pero que este continúa durante la noche, incluso después que la transpiración ha cesado donde la absorción de agua continuará hasta que alcance la mayor turgencia.

La mayor dilatación del tallo (DT MAX) se produce al amanecer antes de la salida del sol alrededor de las 6:00 am, mientras que la mayor contracción (DT MIN) se produce al atardecer, alrededor de las 18:00 horas pm. Estos resultados coinciden con los obtenidos por Wei *et al.* (2007), registrando la máxima contracción en horas de la mañana durante el periodo junio-julio. A su vez Goldhamer *et al.* (1999), reportaron variaciones diarias en árboles de *Viburnum tinus* L. con un máximo que se alcanza cuando la hidratación de los órganos es mayor y un mínimo a las horas de mayor deshidratación. Una contracción diurna anormal indica un estrés hídrico de la planta, resultando un indicador para establecer los límites de riego.

Taiz y Zeiger (2006), plantean que el estrés ejerce una influencia negativa sobre la planta y las respuestas celulares incluyen cambios en la división celular y en la arquitectura de la pared celular, con un aumento de la tolerancia al estrés de las células. Ortuño *et al.* (2006 a y b), han reportado cierta relación entre el grado de contracción y dilatación del tronco y los cambios en el nivel de agua.

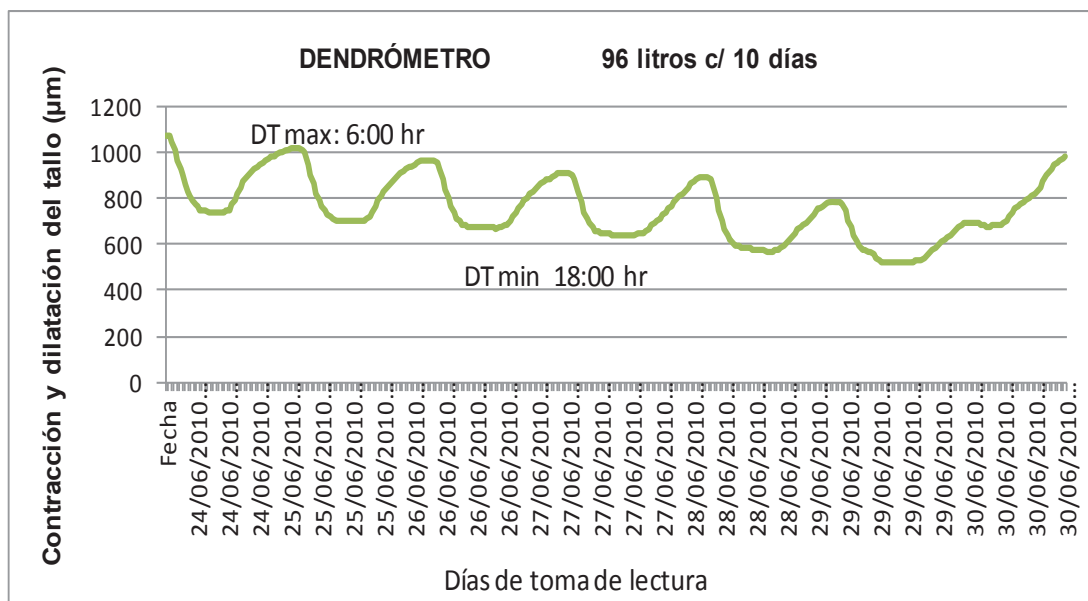


Figura 7. Contracción y dilatación del tallo con una dosis y frecuencia de riego de 96 litros de agua cada diez días en el mes de junio.

En el segundo ensayo de riego se aumentó la dosis a 192 litros de agua cada diez días. En la figura 8, se aprecian las contracciones y dilataciones del tallo en forma ascendente durante los primeros seis días y posteriormente un comportamiento descendente en el momento de existir déficit hídrico, lo que determina que la planta presentó estrés hídrico cuatro veces durante el mes. Se observan incrementos en la dilatación del tallo, asociados al aumento de la dosis de riego (R) y la presencia precipitaciones (P).

En este sentido Krepkowskia *et al.* (2012), en un estudio con *Podocarpus falcatus* utilizando dendrómetros Ecomatik encontró patrones anuales de contracción con una alta variabilidad estacional, determinando que el crecimiento para la especie está muy influenciado por las precipitaciones. Esto demuestra la importancia de las variables climáticas para entender patrones de variación.

La temperatura máxima registrada en este estudio para el ensayo experimental fue de 39,7 °C y las mínimas de 22,6 °C con precipitaciones de 20,8 mm durante los días 16, 26, 29 y 31.

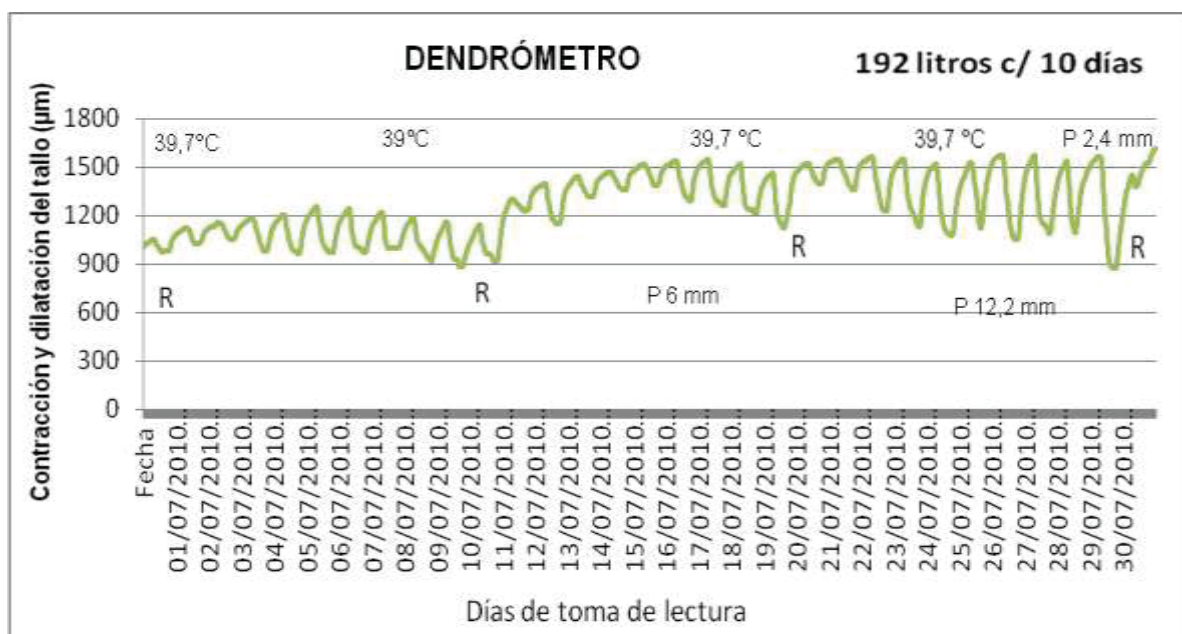


Figura 8. Contracción y dilatación del tallo con una dosis y frecuencia de riego de 192 litros de agua cada diez días en el mes de julio.

En el mes de agosto del 2010 se programó la frecuencia de riego cada siete días con la misma dosis de agua de 192 litros por sesión, correspondiendo al tercer ensayo (figura 9), donde se aprecia una tendencia ascendente los primeros tres días de riego, mostrando déficit los cuatro días posteriores. Suministrada nuevamente la dosis de riego se manifestó una respuesta positiva.

Se reportaron, para este periodo, precipitaciones (P) de 14 mm durante los días 5, 13, 19, 20, 21, 26 y 28, las cuales provocaron una ligera mitigación del estrés al presentar una diferencia menor en la máxima contracción diaria. Conejero *et al.* (2007), y Moreno *et al.* (2007), refieren que la máxima contracción diaria es un indicador adecuado de los cambios del estado hídrico de las plantas.

La temperatura máxima registrada en el mes de agosto del año 2010 fue de 42 °C y mínimas de 24,2 °C, lo que indica un aumento de 2,3 grados en relación al mes anterior que se evidencia en mayor contracción durante los primeros días. Drew *et al.* (2008), destacan la importancia de esta variable y su influencia sobre la velocidad de

los procesos metabólicos de crecimiento en *Eucaliptus sp.* asociado a variables meteorológicas.

Se aprecia un aumento ligero en los valores máximos de dilatación del tallo de 200 a 500 μm , aunque aún es insuficiente la dosis de agua para las necesidades de la planta al estar sometidas repetidamente a condiciones de estrés hídrico.

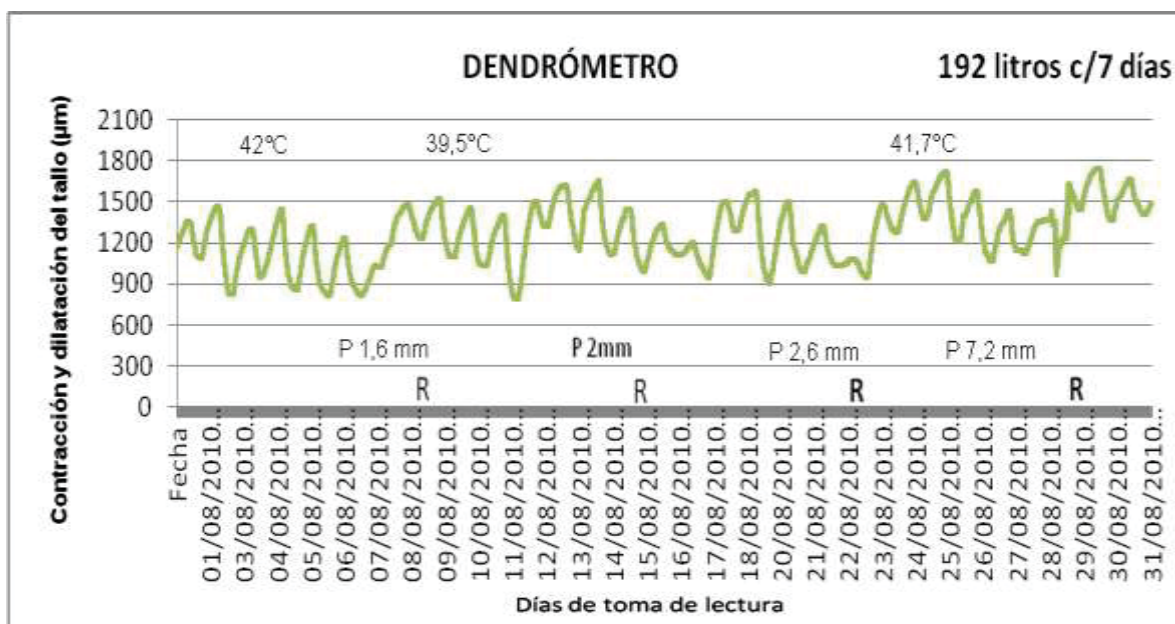


Figura 9. Contracción y dilatación del tallo con una dosis y frecuencia de riego de 192 litros de agua cada siete días en el mes de agosto.

En el mes de octubre se registraron temperaturas máximas de 38 °C y mínimas de 12 °C con ausencia completa de precipitaciones, lo que representa una diferencia de cuatro grados en su temperatura más alta, comparada con el mes de agosto donde los árboles han sido sometidos a menor estrés por factores climáticos, lo cual se aprecia en las lecturas de la figura 10 para una dosis y frecuencia de riego de 192 litros cada siete días con una tendencia ascendente los primeros cuatro días y descendente el resto de los días antes del riego.

La disminución de la temperatura en el clima de otoño hizo posible que las plantas no fueran sometidas a una presión constante, ejercida en los meses de verano, permitiendo una dilatación y contracción del tallo más uniforme entre el día y la noche

que hizo que la planta tuviera una respuesta mejor, sin embargo la tendencia descendente sigue indicando que hasta este momento no ha sido posible la mitigación del estrés hídrico.

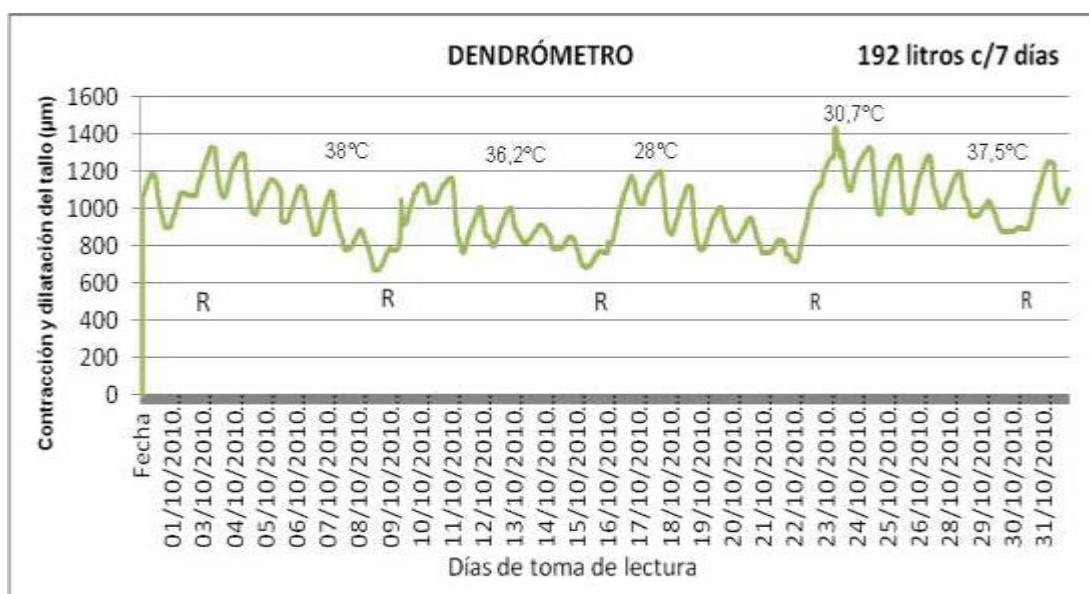


Figura 10. Contracción y dilatación del tallo con una dosis y frecuencia de riego de 192 litros de agua cada siete días en el mes de octubre.

En el mes de noviembre del 2010 (figura 11), durante el periodo comprendido entre el 10 y el 30 de noviembre se registraron temperaturas máximas de 31,4 °C y mínimas de 5 °C, evidenciándose mitigación del estrés hídrico a través de los registros de los dendrómetros en forma ascendente para una dosis y frecuencia de riego de 192 litros de agua cada siete días, lo que indica que es la dosis adecuada para el periodo de otoño. En los primeros días del mes de diciembre las temperaturas empezaron a descender y se suspendieron los riegos con el fin de inducir lentamente el estrés hídrico que coincide con el periodo de dormancia invernal en las plantas. Se aprecian niveles de contracción y dilatación con un incremento menor comparado con el mes de noviembre.

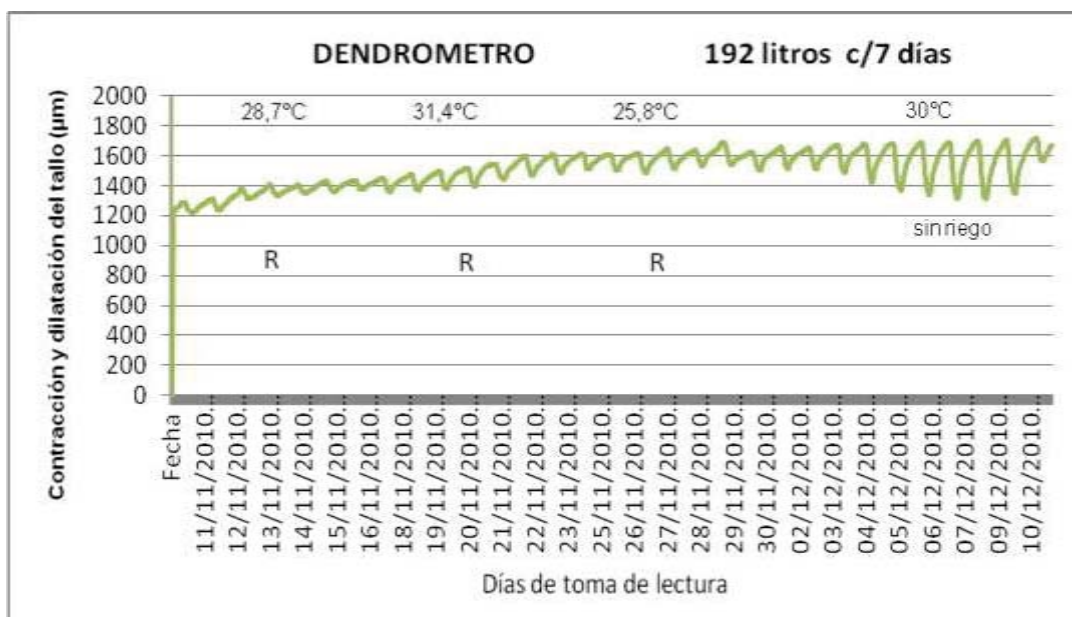


Figura 11. Contracción y dilatación del tallo con una dosis y frecuencia de riego de 192 litros de agua cada siete días en el mes de noviembre.

A partir del mes de enero del año 2011 los sensores registraron contracciones y dilataciones mínimas del tallo, propios de la dormancia invernal (figura 12), indicando que el riego debe suspenderse porque la planta realiza lentamente sus funciones y el requerimiento de agua es menor, de tal manera que en los meses de invierno quedaron suspendidos los riegos hasta la aparición de nuevos brotes en el mes de mayo donde las temperaturas mínimas llegaron a los 20 °C y las máximas superaron los 35 °C.

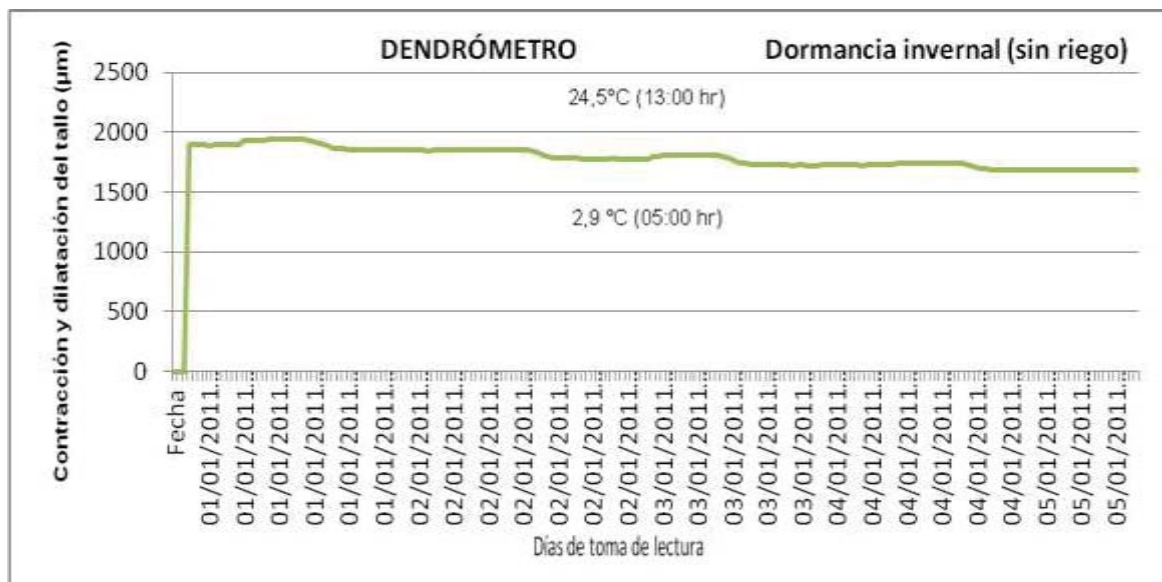


Figura 12. Contracción y dilatación del tallo sin riego en el mes de enero.

En el mes de agosto del 2011 se realizó un aumento de la frecuencia de riego (192 litros de agua cada tres días). Se aprecia que los árboles no mostraron diferencias entre las variaciones diurnas y nocturnas del tallo, lo que evidenció mitigación del estrés hídrico (figura 13).

Se aprecia de manera general una tendencia ascendente en el patrón de comportamiento, lo que representa que esta dosis de riego es la adecuada para los meses calurosos, a partir del mes de mayo y finalizando el mes de octubre donde el riego disminuye a un 50 % en los meses de noviembre y diciembre, hasta suspenderse entre los meses de enero-abril.

Estos resultados se corresponden con lo obtenido por Goldhammer y Fereres (2001), los cuales plantean distintos protocolos para cultivos leñosos de árboles jóvenes y adultos con riegos cada dos y tres días en base a la intensidad de señal utilizada por los sensores. Vélez (2004), plantea la posibilidad de programar los riegos en las plantaciones de cítricos en base exclusivamente a la máxima contracción diaria del tronco.

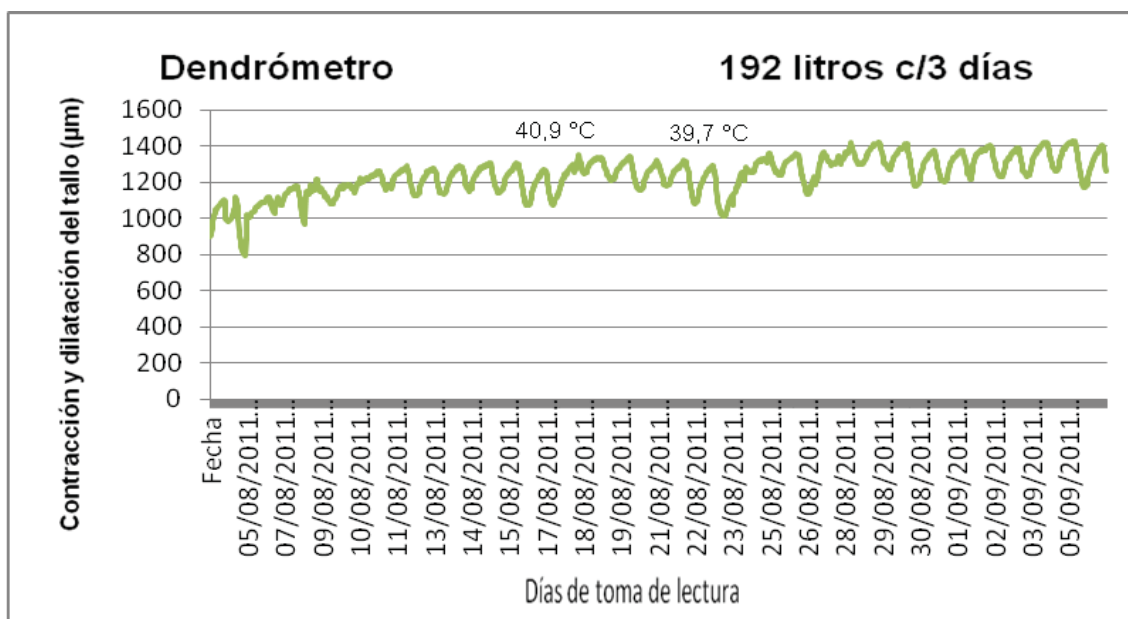


Figura 13. Contracción y dilatación del tallo con una dosis y frecuencia de riego de 192 litros de agua cada tres días en el mes de agosto.

En la tabla 5 se muestran los valores medios y desviación estándar de las variaciones entre la máxima dilatación y contracción por dosis y frecuencias de riego, existiendo diferencias significativas entre los ensayos empleados. La menor variación se presentó en el tratamiento de 192 L/3 días correspondiendo a la dosis donde se logró mitigación del estrés hídrico, lo que corrobora lo descrito anteriormente con la dosis y frecuencia a emplearse.

Tabla 5. Valores medios y desviación estándar de las variaciones entre la máxima dilatación y contracción para las distintas dosis y frecuencias de riego.

Dosis y frecuencia de riego	Media \pm desviación estándar
96 L/10 días	1505,26 ^a \pm 424,99
192 L/10 días	1279,63 ^b \pm 254,29
192 L/7 días	916, 97 ^c \pm 249,11
192 L/3 días	561,63 ^d \pm 89,54

Letras desiguales difieren significativamente para la prueba de Tukey con una $P < 0,05$.

2.2.4 Medidas de humedad del suelo

Las medidas de humedad del suelo a través del sensor watermark reflejaron para el primer ensayo (96 litros de agua cada diez días) lecturas mínimas superiores a los 20 centibares (cB) de presión de humedad del suelo durante el mes de junio, lo que significa que no se logró la saturación suficiente para que exista capacidad de campo necesaria donde los árboles puedan resolver sus necesidades hídricas. En la mayoría de los casos las lecturas se registraron con valores muy similares entre los 30 y 70 cB, que determinan el margen para iniciar los riegos en suelos arcillosos (figura 14). De la misma forma, se observan lecturas cercanas a los 80 cB. Según Urzainqui (2010), valores entre 80 y 100 cB de presión indican que el suelo se está secando peligrosamente y pone en riesgo la viabilidad del cultivo, de tal manera que finalizando el mes de junio se procedió a aumentar la dosis de riego.

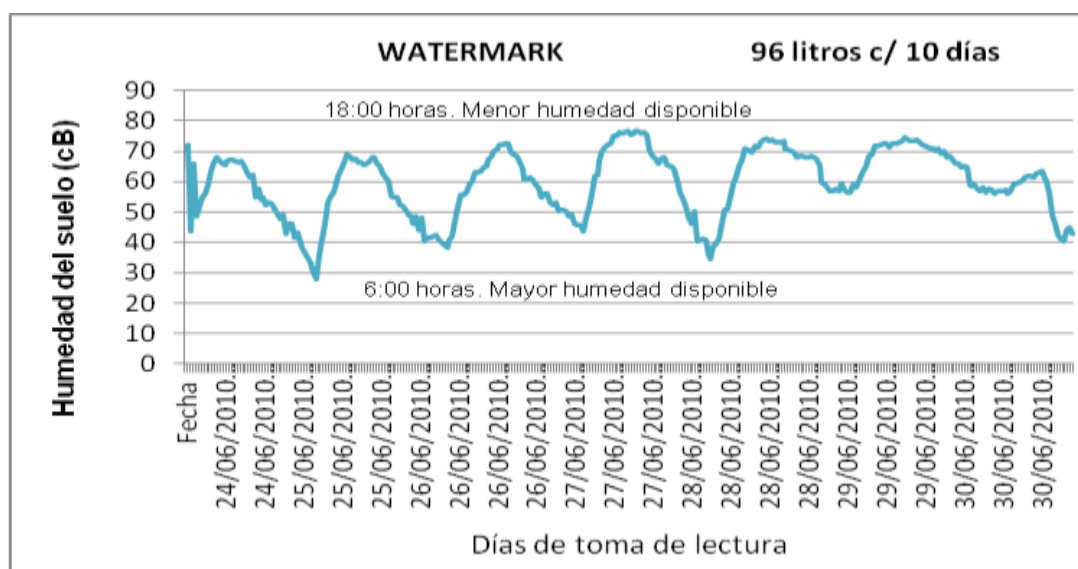


Figura 14. Comportamiento de la humedad del suelo con una dosis y frecuencia de riego de 96 litros cada diez días en el mes de junio.

En la figura 15 se aprecia la respuesta del suelo a la humedad suministrada por el sistema de riego por goteo (R) en el mes de julio, con dosis y frecuencia de riego de 192 litros de agua cada diez días. Se observaron diferencias de presión de 20 cB en los sensores watermark, fundamentalmente en los primeros diez días del mes de julio.

Los días 8, 18, 19 y 25, es donde se presentan las mayores temperaturas (39 °C), obteniendo una mayor presión. Por otro lado, se evidencia una ligera disminución de presión el día 10, mostrando una lectura de 12 cB y al día siguiente de 29 cB, lo que demuestra la influencia de la temperatura en la diferencia de presión de humedad del suelo.

En la segunda quincena del mes se presentaron precipitaciones (P) el día 16 (6 mm) con temperaturas de 34 °C, mostrando lecturas por debajo de los 10 cB. Sin embargo, el día 20 se realiza la sesión de riego, favoreciendo las condiciones de humedad que presentaban antes del ensayo de riego. Posteriormente, el día 26 se registra la mayor precipitación del mes (12 mm) con una temperatura de 31 °C, permaneciendo con valores por debajo de los 10 cB los cuatro días posteriores hasta recibir nuevamente precipitaciones el día 29 (2,4 mm) con 33 °C y el 31 (0,2 mm) con 39 °C, observando un aumento de la presión.

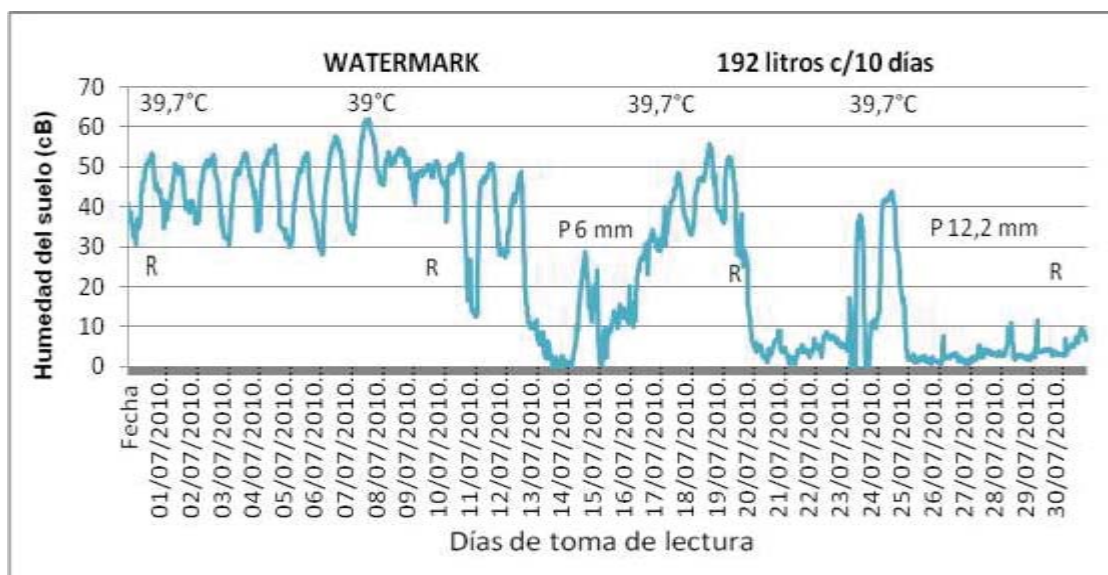


Figura 15. Comportamiento de la humedad del suelo con una dosis y frecuencia de riego de 192 litros de agua cada diez días en el mes de julio.

En la figura 16 se muestran las fluctuaciones durante el mes de agosto donde se programó la frecuencia de riego cada siete días (los días 1, 8, 15, 22 y 29 del mes) con la misma dosis de 192 litros por sesión de riego.

El día tres se registró la temperatura más alta del mes (42 °C), sin embargo se presentó una disminución de presión, alrededor de 15 cB, reflejando que el suelo presenta suficiente humedad pero no cuenta con la saturación necesaria para lograr la capacidad de campo. López (2005), refiere que las diferentes texturas del suelo tienen variadas capacidades de campo debido a las diferencias en el área total expuesta en sus partículas. La capacidad de campo de una arcilla es alta, la de limo es intermedia y la de una arena es baja.

El día 5 de agosto se presentó una ligera precipitación de 0,6 mm, obteniendo valores de 10 cB, disminuyendo ligeramente la presión en los sensores con 1,8 mm de precipitación, hasta el día 8 del mes donde se suministra el próximo riego. Posteriormente, en el día 13 se registran precipitaciones de 2 mm con lecturas por debajo de los 10 cB de presión; los dos días posteriores se reportan aumentos de temperaturas hasta recibir la dosis de riego el día 15 de agosto, lográndose la saturación completa del suelo.

Los días 19, 20 y 21, se registran nuevamente precipitaciones, en este caso de 2 mm. Se aplicó la dosis de riego, lográndose la saturación necesaria para la capacidad de campo hasta el día 24 de agosto. Los días posteriores presentan un aumento en las temperaturas llegando a los 41,7 °C, obteniéndose lecturas cercanas a los 60 cB de presión, lo cual indica que el suelo está secándose.

Se registra la precipitación más alta del mes (7,2 mm), sin embargo las altas temperaturas aumentan la presión en la humedad del suelo, hasta recibir nuevamente la dosis de riego correspondiente al día 29 del mes de agosto. Estos resultados se corresponden con los obtenidos por Ortiz *et al.* (2003 y 2010) en condiciones similares.

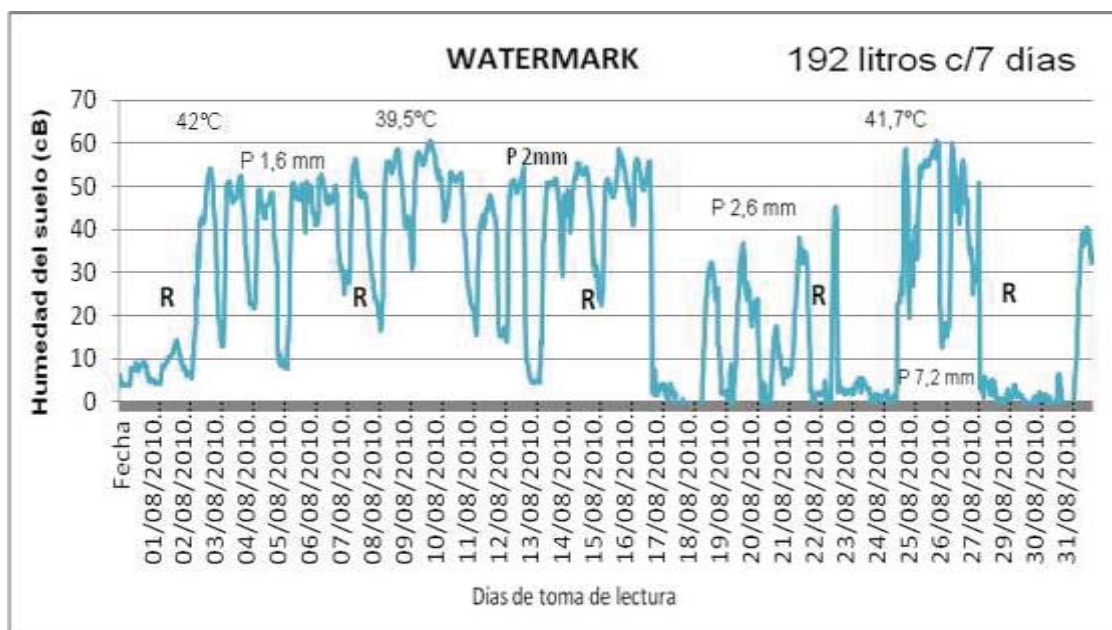


Figura 16. Comportamiento de la humedad del suelo con una dosis y frecuencia de riego de 192 litros de agua cada siete días en el mes de agosto.

En el mes de octubre del 2010 los riegos se realizaron los días 2, 9, 16, 23 y 30, no presentándose precipitaciones. Sin embargo la estación de otoño en el Valle del Yaqui marcó un descenso ligero en las temperaturas, registrándose la más alta el día 8 con 38 °C (figura 17), las cuales permitieron aumentar la presión del sensor watermark por encima de los 30 cB, seguida de una disminución de temperatura, al descender ordenadamente los valores del sensor al momento de la dosis de riego el día 9 de octubre.

El día 16 se aplica la dosis de riego correspondiente, en este caso el sensor registra lecturas cercanas a los cero cB como reflejo de una completa saturación del suelo. Al día siguiente disminuye la temperatura a 28 °C y continúa la presión del suelo por debajo de los 10 cB, demostrándose la relación directa entre la temperatura y la evaporación del suelo registrada en el sensor watermark.

El día 23 se registraron temperaturas de 30,7 °C aumentando ligeramente la presión por encima de los 20 cB pero disminuye inmediatamente después de la sesión de riego. En el mismo mes se presentaron aumentos en la temperatura sobre 37,5 °C aumentando también la presión del sensor a lecturas cercanas a los 40 cB el día 22.

A pesar de tener valores por debajo de 10 cB en la mayoría de los días del mes no ha sido posible la mitigación completa del estrés hídrico debido a que los días anteriores a las sesiones de riego se presentaron valores por encima de los 20 cB y en algunos casos cercanos a los 40 cB. Urzainqui (2010), reportó en una investigación en el Valle del Yaqui para el mes de octubre valores de humedad del suelo variables entre 20 a 60 cB para una profundidad del suelo de 45 cm de profundidad del sensor.

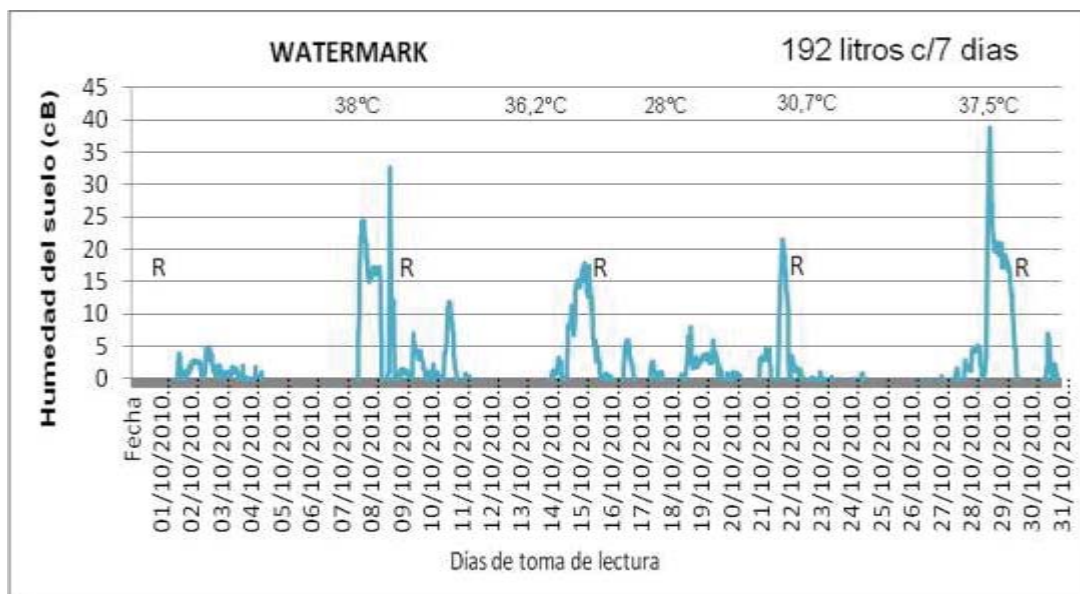


Figura 17. Comportamiento de la humedad del suelo con una dosis y frecuencia de riego de 192 litros cada siete días en el mes de octubre.

En el mes de noviembre se demostró la mitigación del estrés hídrico al mantenerse los valores por debajo de los 5 cB de presión (figura 18), lo que indica que en este mes la dosis de 192 litros de agua cada siete días es la adecuada para satisfacer las necesidades hídricas de la especie bajo la influencia de las temperaturas, comprendidas entre los 26 °C y 31,4 °C durante el periodo. Posteriormente, al iniciar el mes de diciembre las temperaturas descendieron a 3,9 °C con máximas de 30,6 °C de tal manera que se suspendieron los riegos a partir de esta fecha, registrándose un aumento de la presión hasta los 55 cB, existiendo presión suficiente en el suelo para llevar lentamente la especie al estrés hídrico, coincidiendo con el periodo de

dormancia invernal. Se aprecia claramente un patrón de comportamiento diferente a partir de la suspensión de los riegos en el mes de diciembre del 2010.

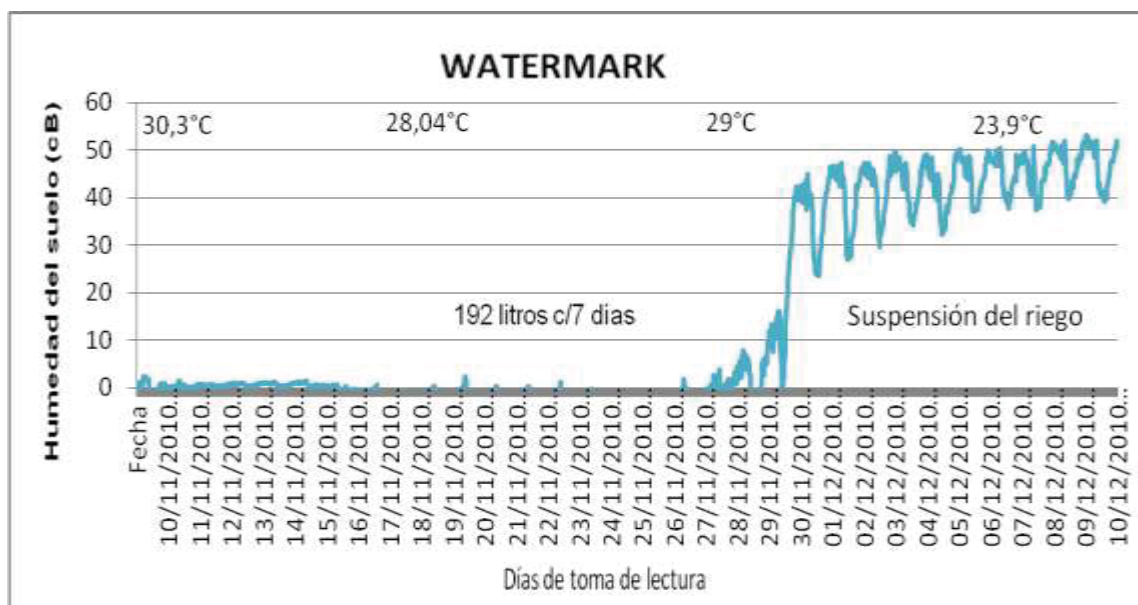


Figura 18. Comportamiento de la humedad del suelo con una dosis y frecuencia de riego de 192 litros de agua cada siete días en el mes de noviembre y diciembre.

En el mes de enero del 2011 después de suspender los riegos, al evidenciarse la dormancia invernal de la especie, los valores se mantuvieron entre los 60 y 80 cB (figura 19), lo que representa desecación del suelo. Sin embargo la especie no mostró estrés hídrico, por lo que se suspendieron los riegos hasta el mes de mayo donde la planta inició nuevamente con el desarrollo meristemático apical.

Durante el mes de enero se realizaron riegos ligeros para evitar el riesgo de alguna helada, registrándose temperaturas máximas (T_{max}) de 24,5°C y temperaturas mínimas (T_{min}) de 2,9 °C el día 4 de enero donde las plantas no registraron movimientos en sus funciones, lo que refleja que a pesar de tener lecturas cercanas a los 80 cB, las bajas temperaturas determinan que no es necesario efectuar labores de riegos.

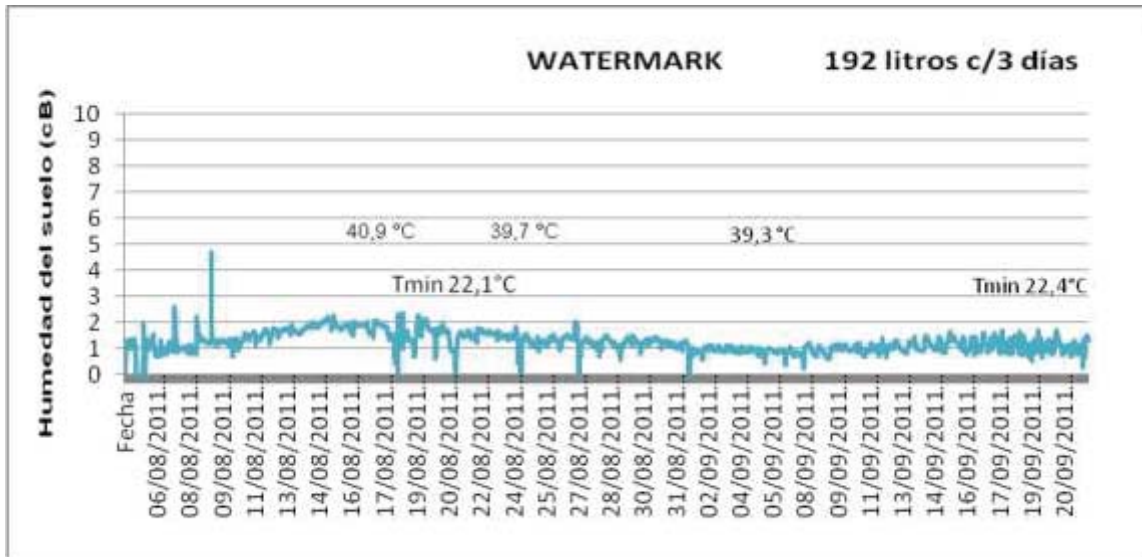


Figura 20. Comportamiento de la humedad del suelo con una dosis y frecuencia de riegos de 192 litros cada tres días en el mes de agosto.

2.2.5 El déficit de presión de vapor. Relaciones con el suelo y la planta.

En la figura 21 se muestran los valores medios y desviación estándar del déficit de presión de vapor (DPV) y la temperatura, para el año 2010 y 2011, observando que coinciden para valores menores de DPV menores temperaturas, es decir, que en el año 2011 donde se registraron menores temperaturas, el DPV fue menor.

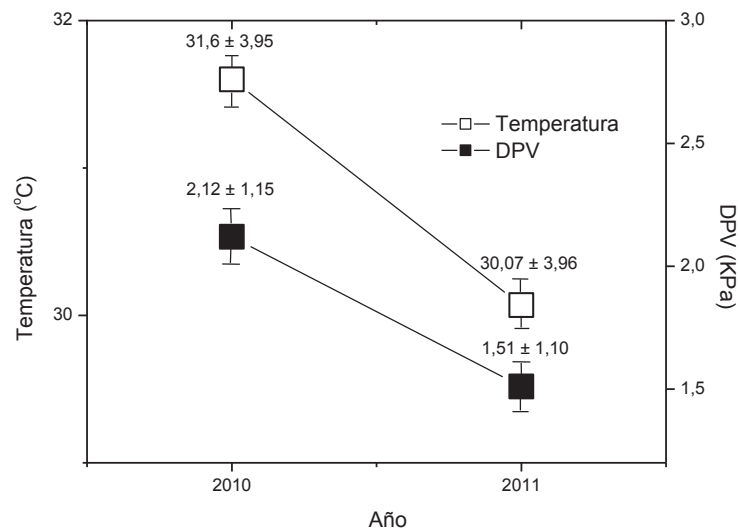


Figura 21. Valores medios del DPV y temperatura/años.

En la tabla 5 se muestra la correlación no paramétrica de Spearman obtenida para las variables temperatura, DPV y humedad del suelo para el año 2010. Los resultados reflejan una correlación significativa, lo cual demuestra el alto grado de relación entre las variables, siendo significativamente superior la temperatura y el DPV con un coeficiente de correlación de 0,96. La relación de la humedad del suelo con las otras variables es significativa, pero muy baja.

Tabla 5. Matriz de correlación de Spearman para variables relacionadas con la economía hídrica de la planta en el año 2010.

	T_2010	DPV_2010	Humedad del suelo _2010
T_2010	1,000	,965(**)	,249(**)
DPV_2010		1,000	,285(**)
Humedad del suelo _2010			1,000

** La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

En la figura 22 (a y b) se muestra el comportamiento del déficit de presión de vapor (DPV), la contracción y dilatación del tallo (CDT) y la humedad del suelo (HS) durante el mes de julio del 2010. En ambas, aparecen las sesiones de riego representadas por (R) y las precipitaciones por (P). Los resultados indican que durante los días primero y ocho, donde se registraron temperaturas que superan los 39 °C, el DPV alcanzó valores entre 5,5 y 6 KPa y la presión de humedad del suelo de 69 cB, evidenciando que un aumento de la temperatura incide en la planta y el suelo.

En el día 16 se registra una ligera precipitación de 6 mm con un descenso de la temperatura de 34,9 °C, un valor del DPV de 3 KPa (DPV), notando la saturación completa del suelo con cero cB, lo que representa un ligero aumento en la dilatación del tallo que se mantiene los próximos tres días hasta llegar al déficit hídrico por encima de los 60 cB hasta la sesión de riego realizada el día 20 con un ligero descenso de la temperatura y aumento en la dilatación del tallo con temperatura sostenidas de 37 °C y 4,9 KPa de presión, manteniéndose saturado el suelo hasta el día 29, donde se registra un ligero descenso hasta recibir nuevamente riego el día 30 de agosto, acompañado de un aumento de la temperatura en 39 °C y 5,3 KPa de presión.

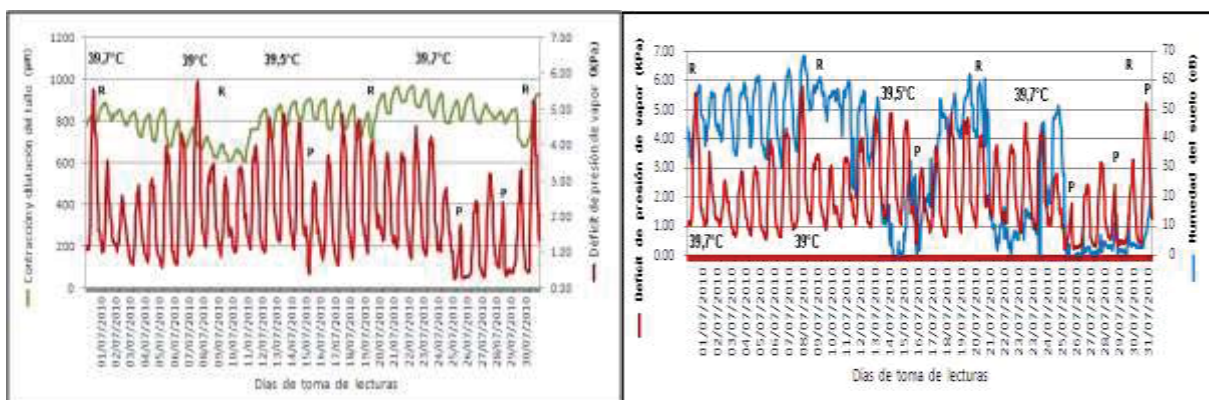


Figura 22. Comportamiento para julio del 2010. (a) DPV y CDT; (b) DPV y HS.

En sentido general, un aumento de las temperaturas provoca un aumento de la presión de humedad del suelo y la mayor variación de la contracción y dilatación del tallo, el cual coincide con los días en que se presentó déficit hídrico.

Cohen (1994) y Mybur (1996), en un estudio en zonas semiáridas plantean que durante las primeras horas del día el DPV aumenta y la variación del diámetro del tronco (VDT) disminuye. Cuando el DPV alcanza el máximo valor, la VDT alcanza el mínimo diario, lo que corresponde a su fase de deshidratación. También refiere que durante la tarde la demanda evaporativa disminuye, lo que lleva a una fase de rehidratación de los tejidos provocando una expansión del diámetro del tronco que llega a un máximo durante la noche, y el crecimiento que experimenta el tronco se ve reflejado cuando esta expansión supera el máximo del día anterior.

Genard *et al.* (2001) y Garner y Berger (1987), proponen una teoría basada en el flujo pasivo del agua, que provoca una propagación radial del potencial foliar en el floema y tejidos extensibles que inducen la contracción y dilatación del tronco en el curso del día.

En la figura 23 (a y b), se demuestra la mitigación del estrés hídrico el día tres y seis de agosto al presentarse riego y seguido una precipitación ligera, a pesar de registrar temperaturas de 42 °C. Sin embargo, en días previos al riego se registran temperaturas de 39,5 °C y el DPV muestra valores por encima de los 5 Kpa,

presentando un descenso que demuestra la relación del estrés de la planta con las altas temperaturas.

Durante los días 11, 17, 22 y 30 se manifiesta un aumento en la dilatación del tallo con temperaturas cercanas a los 40 °C. Se presentaron precipitaciones los días 13, 19, 20, 21, 26 y 28 manifestando estrés solo en aquellos días donde la planta no tenía humedad disponible, lo que demuestra que la dosis de riego de 192 litros cada siete días no era suficiente para satisfacer las necesidades de la planta, registrando lecturas por encima de los 50 cB.

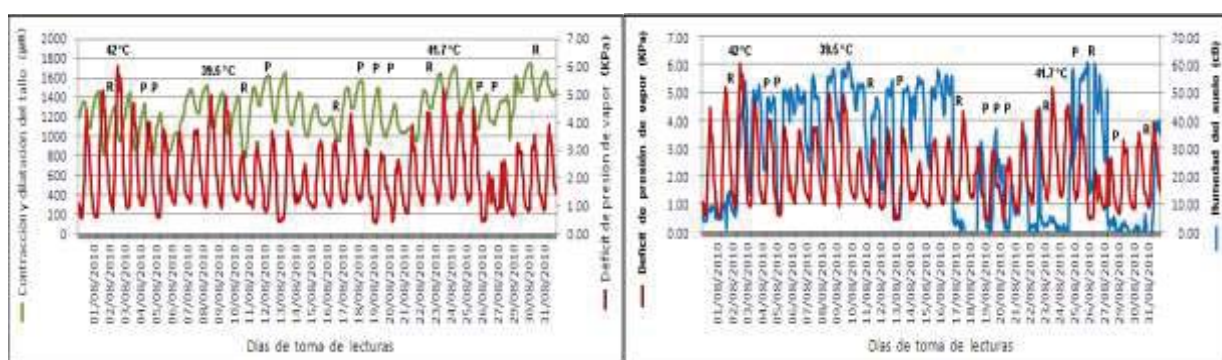


Figura 23. Comportamiento para agosto del 2010. (a) DPV y CDT; (b) DPV y HS.

En el mes de octubre no se presentaron precipitaciones y las temperaturas se mantuvieron cercanas a los 37 °C los días 8, 12 y 19, con mayor contracción del tallo los días previos al riego. El día 8 de octubre se evidencia un aumento en la temperatura (38 °C), siendo la máxima registrada durante el mes donde la mayor contracción del tallo coincide con la evaporación del suelo registrada por el dendrómetro (figura 24 a y b). En los días posteriores, se aprecian contracciones y dilataciones en forma descendente hasta aplicarse las sesiones de riego, coincidiendo nuevamente con un aumento de la temperatura el día 29 de octubre (37,5 °C) registrando el sensor de humedad de suelo lecturas por encima de los 30 cB y una mayor contracción del tallo previas a la sesión de riego el día 30 de octubre.

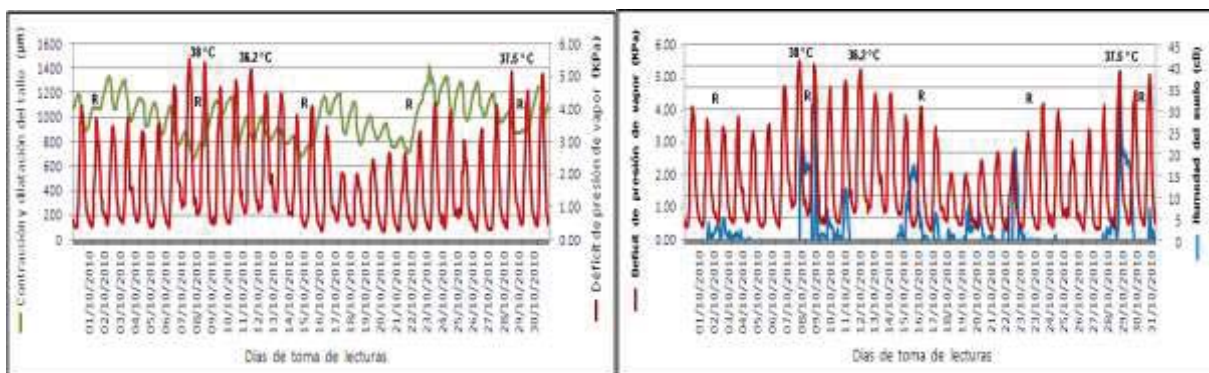


Figura 24. Comportamiento para octubre del 2010. (a) DPV y CDT; (b) DPV y HS.

Durante el mes de noviembre del 2010 la temperatura máxima registrada fue de 31,4 °C y la mínima de 8 °C, manifestándose una saturación del suelo y mitigación del estrés hídrico bajo estas condiciones climáticas. En el mes de diciembre fueron suspendidos los riegos, pero las diferencias de temperaturas comparadas con los meses de calor permitieron la suspensión de riegos, induciendo lentamente a los árboles al estrés hídrico y dormancia invernal (figura 25 a y b).

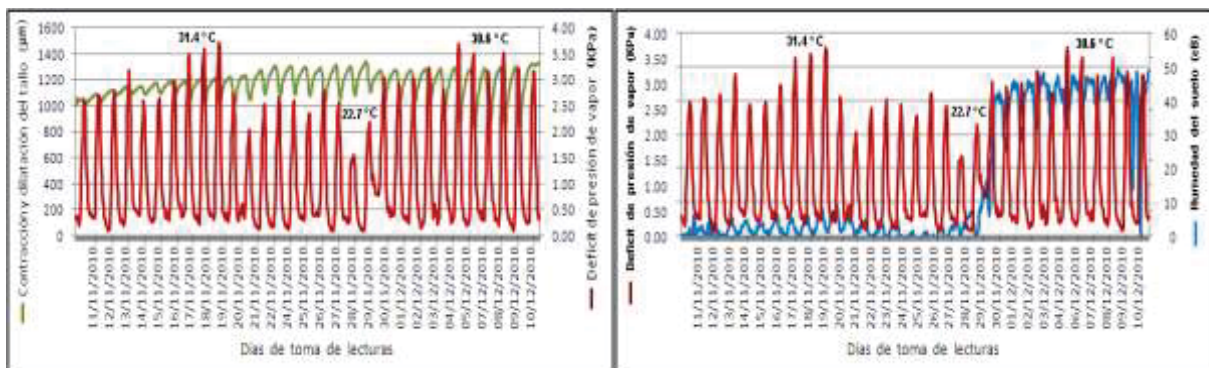


Figura 25. Comportamiento para noviembre del 2010. (a) DPV y CDT; (b) DPV y HS.

En agosto del 2011 correspondiente al periodo de mitigación del estrés hídrico, se evidencia un aumento de las temperaturas, aunque la contracción y dilatación del tallo mantiene una evolución ascendente (figura 26 a y b). La humedad del suelo muestra una relación directa con la evaporación del suelo por efecto de la temperatura, aunque los niveles se conservan por debajo de los 2,5 cB, lo que significa que a pesar de

existir condiciones extremas de calor mientras el suelo presente humedad de manera permanente se favorecerá el crecimiento para la especie.

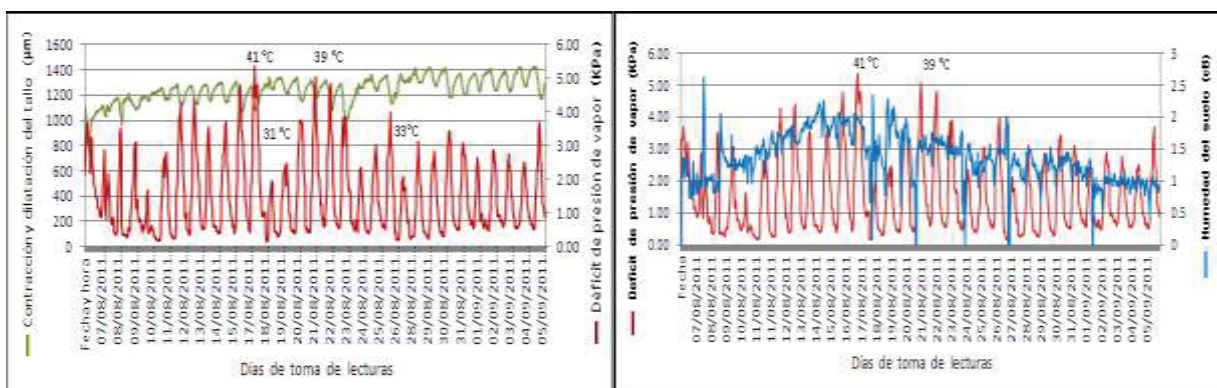


Figura 26. Comportamiento para agosto del 2011. (a) DPV y CDT; (b) DPV y HS.

En la figura 27 se observa una correlación lineal creciente entre las variables presión de humedad del suelo (PHS) y la variación medida entre la contracción y dilatación $\Delta(C/D)$, lo cual indica una alta relación ($R^2 = 0,71$), donde se evidencia que para valores bajos de PHS, es decir una saturación del suelo, se alcanza una menor variación en la contracción y dilatación del tallo como expresión de mitigación del estrés hídrico.

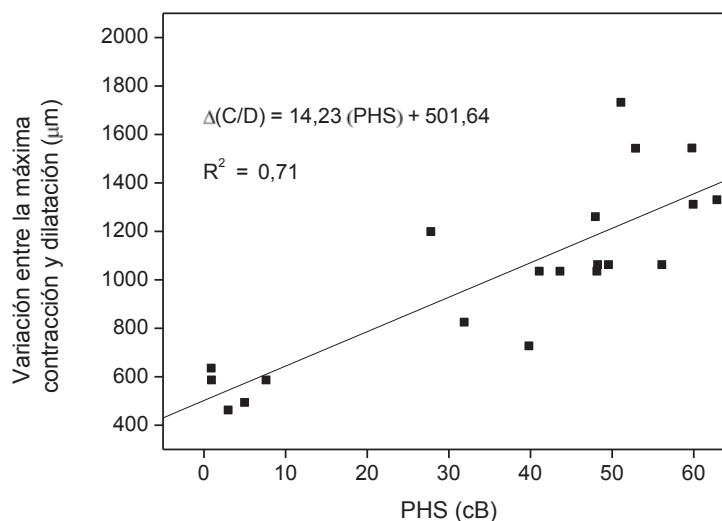


Figura 27. Relación entre PHS y $\Delta(C/D)$

2.2.6 Evapotranspiración

La evapotranspiración entendida como el agua perdida por una masa vegetal más la evaporación del suelo resulta un indicador de gran utilidad práctica. En la tabla 7, se muestran los valores obtenidos de evapotranspiración (ETc) en las condiciones del Valle del Yaqui para suelo vertisol. Estos resultados permiten estimar el volumen de agua consumido por *Cedrela odorata*, con una evapotranspiración del cultivo de 1 320 mm. Urzainqui (2010), en un estudio sobre monitoreo de la humedad del suelo y programas de riego en *Citrus sinensis* en el Valle del Yaqui obtuvo una evapotranspiración de 1 307 mm, reportando que hubo un déficit de 264 mm de la lámina real.

Al evaluar la evapotranspiración del cultivo resulta interesante considerar los criterios de Gispert *et al.* (1983), los cuales refieren que la evapotranspiración depende de factores como la radiación, viento, humedad, tipo de suelo y la vegetación. En el estudio los valores obtenidos de evapotranspiración están influenciados por los factores antes mencionados.

Tabla 6. Evapotranspiración del cultivo en condiciones de suelo vertisol compactado del Valle del Yaqui.

Evapotranspiración del cultivo (ETc)	Coefficiente del cultivo (Kc)	Evapotranspiración de referencia (ETo)
1 320 mm	0,70	1 887 mm

2.2.7 Lámina de riego

Los resultados de mitigación del estrés hídrico utilizando los sensores de humedad del suelo y los dendrómetros, indicaron que para satisfacer las necesidades hídricas de cada árbol es necesario regar 192 litros cada tres días, equivalente a 0,192 m³ por cada riego/ha, a un espaciamiento de 3 x 3 m², es decir esa dosis y frecuencia para un área de 9 m² en los meses calurosos, hasta disminuir la misma a la mitad en el mes de noviembre para la dormancia invernal de la especie.

La lámina de riego calculada a partir del volumen de agua y el área resultó en 0,021 m (2,1 cm) de riego por cada árbol.

Los resultados de esta investigación demuestran que se requiere 192 litros de agua por 1,111 árboles/ha, para un total de 213 312 litros de agua, equivalente a 213 m³/ha por riego, con dos riegos por semana para 426 m³/ha. Considerando que a partir del mes de mayo inicia el periodo de calor se realizará la programación de riego hasta el mes de octubre y en el mes de noviembre el mismo se reducirá a la mitad.

El total de semanas comprendidas en este periodo es de 31 semanas, haciendo un total de 13 225 m³/ha. Es decir 13,22 millares de m³, lo cual coincide con la evapotranspiración obtenida en el epígrafe anterior que determina que la cantidad de agua que sale al sistema es la misma que se incorpora con el sistema de riego.

2.3 Conclusiones parciales

- Las propiedades químicas y físicas del suelo vertisol compactado indican que son pobres, con bajos contenidos de materia orgánica, pH básico y de textura arcillosa, siendo una limitante para el desarrollo de *Cedrela odorata*, siempre y cuando no se garantice el recurso hídrico.
- Se presentan variaciones en la contracción y dilatación del tallo, lo cual indica situaciones de estrés hídrico hasta agosto del año 2011 que se logra la mitigación del estrés con una dosis y frecuencia de riego de 192 litros de agua cada tres días.
- Se demostró que para valores por debajo de los 15 cB, el suelo se satura satisfaciendo las necesidades hídricas de la especie y una alta relación entre la planta y el suelo.

CAPÍTULO III. RESPUESTA FISIOLÓGICA DE *Cedrela odorata* ANTE LA MITIGACIÓN DEL ESTRÉS HÍDRICO.

3.1 Materiales y métodos

3.1.1 Procedimiento utilizado para evaluar la respuesta fisiológica de las plantas

Con la dosis y frecuencia de riego de 192 litros de agua cada tercer día, aplicada a la plantación de *Cedrela odorata* para la mitigación del estrés hídrico en agosto del año 2011, se evaluó la respuesta fisiológica de las plantas. Para ello, se determinó el potencial hídrico y sus componentes (contenido hídrico simplástico, contenido hídrico relativo a turgencia cero, potencial osmótico a plena turgencia, potencial osmótico a turgencia cero y módulo de elasticidad de la pared celular), además se determinaron medidas de intercambio gaseoso (fotosíntesis, transpiración y conductancia estomática) y su respuesta a las variaciones ambientales (radiación fotosintéticamente activa (PAR), déficit de presión de vapor (DPV) y temperatura de la hoja).

En los siguientes epígrafes se describe el procedimiento metodológico empleado para cada caso.

3.1.1.1 Metodología para determinar el potencial hídrico y sus componentes

Potencial hídrico

La determinación del potencial hídrico se realizó en horas del alba o pre-amanecer (5:30 am) a una temperatura de 21 °C y humedad relativa del 57 %, al mediodía (1:00 pm) a una temperatura de 38 °C y humedad relativa del 23 % y al atardecer (6:00 pm) con una temperatura de 32 °C y humedad relativa de 40 %, el día 11 de julio del 2012, correspondiendo a la estación de verano. Para ello se utilizó la cámara de Scholander o de presión mediante la adaptación del método descrito por Lenz *et al.* (2006), a partir del cual se tomaron muestras de siete árboles, seleccionados en igualdad de condiciones, considerando sus características fenotípicas (árboles sanos, vigorosos, de buen porte, de estructura homogénea y con una distancia mínima de separación entre ellos de 5 m). Posteriormente se colocó el material vegetal en el interior del cilindro de la cámara y se aplicó una presión la cual hizo que saliera una gota de agua en la superficie del tallo, marcando así en el manómetro de la

cámara el potencial hídrico de madrugada (de base o al alba), mediodía y atardecer. Este procedimiento se realizó directamente en las condiciones de campo en árboles con riego cada tercer día y sin riego (estrés), para validar el efecto de la estabilización del riego sobre el estado hídrico de la planta y por consiguiente en sus funciones fisiológicas. Para realizar la determinación en las plantas sin riego se suspendió el mismo en una parte de la parcela experimental.

Los valores de potencial hídrico fueron determinados considerando como factor las plantas con riego cada tercer día y con estrés y las horas de evaluación al alba, mediodía y atardecer, los cuales fueron comparados estadísticamente mediante la prueba no paramétrica de U de Mann-Whitney, una vez demostrado que no se cumplieron los supuestos teóricos de normalidad y homocedasticidad de la varianza.

Construcción de curvas presión-volumen

Para construir las curvas presión-volumen, primeramente se seleccionó una hoja de cada árbol bajo la estabilización del sistema de riego por goteo y se realizó un corte limpio del pecíolo, las cuales se colocaron en agua destilada, protegiéndolas contra la deshidratación y se almacenaron en el laboratorio en condiciones de oscuridad y baja temperatura (8 °C). En horas de la mañana del día siguiente cada hoja se pesó, utilizando una balanza analítica de 0,0001 mg de precisión y se introdujo en el cilindro de la cámara de presión para determinar el valor de su potencial y posteriormente se dejó a libre exposición. El procedimiento se repitió hasta que el peso de la hoja fue constante en intervalos regulares de tiempo; luego de alcanzar bajos potenciales hídricos la muestra se colocó en una estufa a 80 °C durante 48 horas para determinar el peso seco.

Se determinó el contenido hídrico relativo (CHR) de cada muestra mediante la siguiente expresión (Lenz *et al.*, 2006):

$$CHR = \frac{Pf - Ps}{Pt - Ps} * 100$$

Donde:

Pf: Peso fresco de la hoja

Ps: Peso seco de la hoja

Pt: Peso a máxima turgencia

El peso fresco se calculó como el peso promedio antes y después de la medición del potencial hídrico.

El peso a máxima turgencia se estimó mediante un análisis de regresión lineal entre el potencial hídrico y peso fresco, tomando los datos correspondientes a las primeras mediciones que ofrecieron un mayor grado de relación, según criterios de Kubiske y Abrams (1991). A partir de estos datos se elaboró la curva presión-volumen, en la cual el eje de las ordenadas representa el valor del inverso del potencial hídrico ($1/\Psi_w$) en MPa^{-1} y el eje de las abscisas, el valor de $1-\text{CHR}$. En el eje de las abscisas, la escala normalmente empleada es de orden decreciente iniciando por CHR igual al 100 % donde se cruzan los ejes. Se determinó además la relación entre el peso turgente y el peso seco de las muestras.

Componentes del potencial hídrico

Una vez construida la curva presión-volumen se determinaron los componentes del potencial hídrico, según metodología descrita por Azcon-Bieto y Talón (2001):

El contenido hídrico simplástico (CHS), se determinó a partir de la extrapolación de la recta que relaciona $1/\Psi_w$ y $1-\text{CHR}$.

El contenido hídrico relativo a turgencia cero (CHR^0), correspondiente al punto de inicio de la plasmólisis.

El potencial osmótico a plena turgencia (Ψ_s^{100}), mediante la extrapolación de la zona lineal de la curva presión-volumen, a partir del punto de pérdida de turgencia hasta el valor de $1/\Psi_w$ correspondiente al 100 % del contenido de agua del tejido (CHR), siendo CHR al 100 % el inverso de la presión de equilibrio, equivalente a la presión osmótica a plena turgencia.

El potencial osmótico a turgencia cero (Ψ_s^0), correspondiente al valor del potencial en el punto de inicio de la plasmólisis.

Además se determinó el módulo de elasticidad de la pared celular (ε), utilizando la ecuación propuesta por Lenz *et al.*(2006):

$$\varepsilon = \frac{P_1 - P_2}{R_1 - R_2} (R_m - R_a)$$

Donde:

P1: Presión en el punto de máxima turgencia

P2: Presión en el punto de pérdida de la turgencia

R1: CHR en el punto de máxima turgencia

R2: CHR en el punto de pérdida de la turgencia

Rm: Promedio de CHR de R1 y R2

Ra: Fracción de agua apoplástica.

3.1.1.2 Medidas de intercambio gaseoso

Para las medidas de intercambio gaseoso se realizó un muestreo el día 11 de julio del 2012 (estación de verano) en hojas jóvenes, bajo las mismas condiciones descritas en el ensayo experimental, utilizando un sistema portátil de fotosíntesis (irgaporometro LI 6400 XT). Para ello se hizo un seguimiento de la marcha diurna de la fotosíntesis expresada en $\mu\text{mol}(\text{CO}_2)\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$, transpiración ($\text{mmol}(\text{H}_2\text{O})\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$) y conductancia estomática ($\text{mmol}(\text{H}_2\text{O})\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$) en función de las variables microclimáticas (radiación fotosintéticamente activa (PAR) ($\mu\text{mol}(\text{fotones})\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$), déficit de presión de vapor (PDV) (KPa) y temperatura de la hoja ($^{\circ}\text{C}$) a lo largo del día, registrando valores cada tres horas, a las 7:30 am, 10:30 am, 1:30 pm, 4:30 pm y 7:30 pm horas solares.

Se seleccionaron cinco árboles con similares características (buen estado fenotípico, incidencia de la luz, posición de las hojas).

Se tomó una muestra de hojas de cada individuo, se adjuntaron con una cinta adhesiva, se identificaron con una etiqueta y posteriormente fueron colocados en una pinza atada a la unidad central del cable para las medidas con termopares y sensores de radiación interna y externo.

3.1.1.3 Toma de datos relacionados con el crecimiento de *Cedrela odorata*

Se realizaron podas mecánicas como parte de las intervenciones silviculturales, de acuerdo a las necesidades de la plantación.

Para el estudio del crecimiento de la especie se midió la altura de las plantas utilizando cinta métrica y el diámetro con un calibrador vernier, durante los primeros cuatro años de establecida la plantación. En el primer año (2009) se realizaron mediciones mensuales; en el segundo año (2010) se midió en agosto y diciembre; en el año 2011, en el mes de enero, correspondiente al periodo vegetativo, y durante la mitigación del estrés hídrico desde septiembre hasta diciembre del mismo año y la última medición se realizó en julio del 2012.

3.2 Resultados y discusión

3.2.1 Comportamiento del potencial hídrico y sus componentes

La disponibilidad de agua es un factor que determina la distribución de las especies vegetales. El éxito de una repoblación forestal, depende en gran medida, de la capacidad de desarrollo de las plantas bajo situaciones de estrés hídrico. En la tabla 7, se presentan los valores obtenidos de potencial hídrico en horas del alba, mediodía y atardecer, mostrando diferencias significativas entre las medidas de potencial hídrico a las 5:30 am, con las 1:00 pm y 6:00 pm, no siendo así entre la 1:00 pm y 6:00 pm, con temperaturas de 38 °C y 32 °C y una humedad relativa de 23 y 40 %, respectivamente, manteniéndose con el mismo valor de potencial hídrico (-1,2 MPa) aún cuando al atardecer (6:00 pm) las temperaturas son menores y la humedad relativa es más alta. Por otra parte, se aprecian diferencias significativas entre las medidas de potencial hídrico para las plantas sometidas a riego estabilizado y con estrés, lo cual demuestra su influencia en el estado hídrico de la plantas.

Los valores de potencial hídrico que se reportan para la especie *Cedrela odorata*, una vez que se mitiga el estrés se consideran altos, lo cual pudiera deberse a la frecuencia de riego a la cual está sometida esta plantación (riego cada tercer día), que le permite independientemente de que se encuentre en una zona semiárida caracterizada por la sequedad del medio mantener potenciales hídricos elevados.

Tabla 7. Valores medios de potencial hídrico por horas y frecuencias de riego (cada tercer día y sin riego) para plantas de *Cedrela odorata*.

Tratamiento	Valores medios de potencial hídrico (MPa)		
	5:30am (alba)	1:30pm (mediodía)	7:00pm (atardecer)
Riego cada tercer día	-0,9 ^{Aa}	-1,2 ^{Ba}	-1,2 ^{Ba}
Sin riego	-1,2 ^{Ab}	-1,6 ^{Bb}	-1,5 ^{Bb}

En una misma columna letras desiguales difieren significativamente para la prueba de U Mann Whitney con una $P < 0,05$ (las letras mayúsculas corresponden a las horas y las minúsculas al tratamiento).

En las figuras 30, 31 y 32 se muestra el comportamiento de los datos obtenidos para la construcción de las curvas presión-volumen a partir del peso fresco y el potencial hídrico, mostrando un comportamiento similar a los resultados de Azcon-Bieto y Talón (2001) y Polania *et al.*, (2003).

Se observa que en las primeras mediciones, al encontrarse las hojas saturadas, el contenido hídrico relativo resultó alto, por lo tanto, el potencial hídrico también resulta alto, ya que las células se encuentran hidratadas ocasionando que la concentración de solutos sea baja, y como el potencial del agua pura es cero, el potencial hídrico de las hojas saturadas será cercano a cero.

Se aprecia que en la medida que la hoja perdió agua, el potencial hídrico bajó, con una tendencia exponencial hasta que la relación se volvió rectilínea; las células deshidratadas retienen el agua que les queda a bajos potenciales, debido a diferentes mecanismos como el ajuste osmótico. En *Cedrela odorata* el potencial hídrico puede descender hasta valores de -1.62 MPa.

Por otra parte con la regresión lineal se estimó el valor del peso a máxima turgencia, resultando en 2,29 g, el cual permitió el cálculo del contenido hídrico relativo.

Para la especie en estudio la relación existente entre peso turgente/peso seco de las hojas, la cual estima la acumulación de solutos en el tejido, se encuentra en un valor de 7,63; relativamente alto comparado con los obtenidos por Ruiz (1999), en *Erythrina edulis* que fue de 0,22 y Polania *et al.*, (2003) en *Saccharum officinarum* que osciló de 3,27-3,49, lo cual indica que la especie *Cedrela odorata* es altamente eficiente al uso del agua.

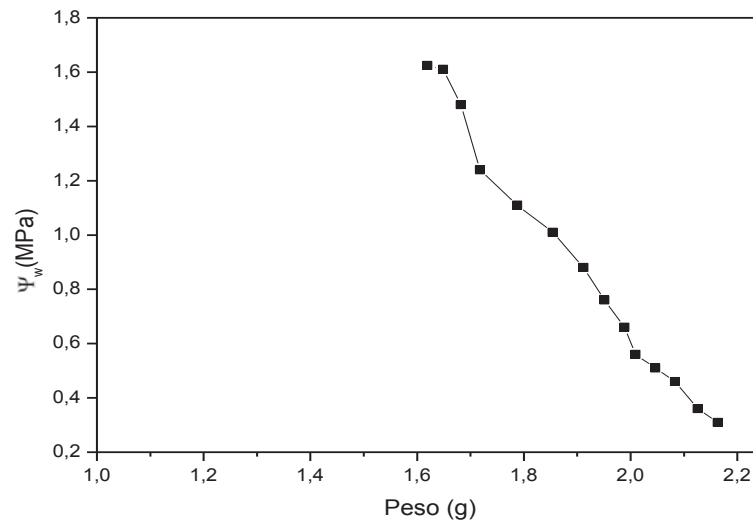


Figura 30. Medidas de potencial hídrico y peso fresco de las hojas de *Cedrela odorata* en intervalos regulares.

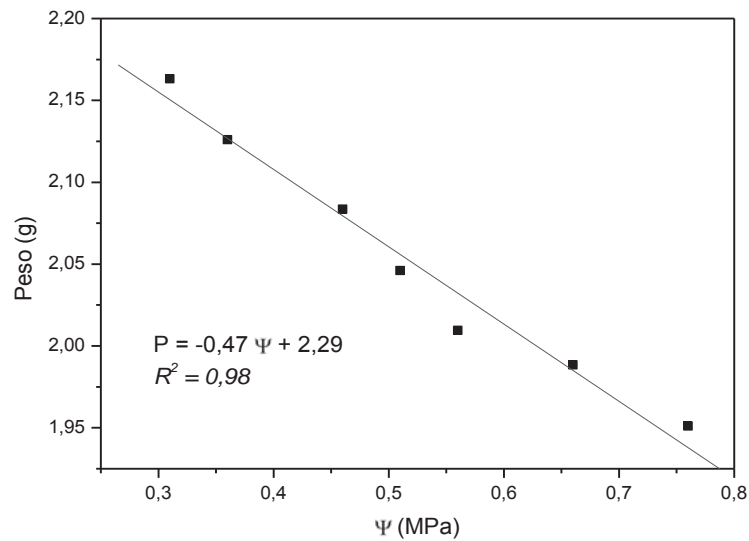


Figura 31. Representación de la regresión lineal para estimación del peso a máxima turgencia.

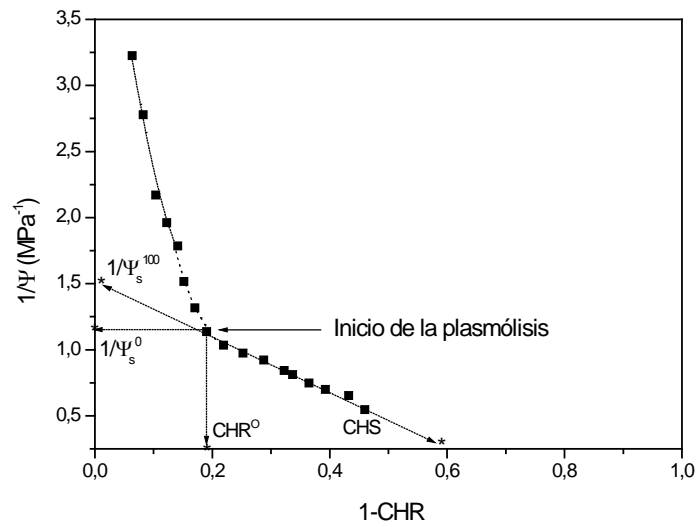


Figura 32. Curva presión-volumen para *Cedrela odorata*.

La figura 33, muestra la extrapolación de la recta a partir del punto de inicio de la plasmólisis, obteniendo el valor de potencial osmótico a plena turgencia mediante la ecuación de regresión, con un coeficiente de 0,99.

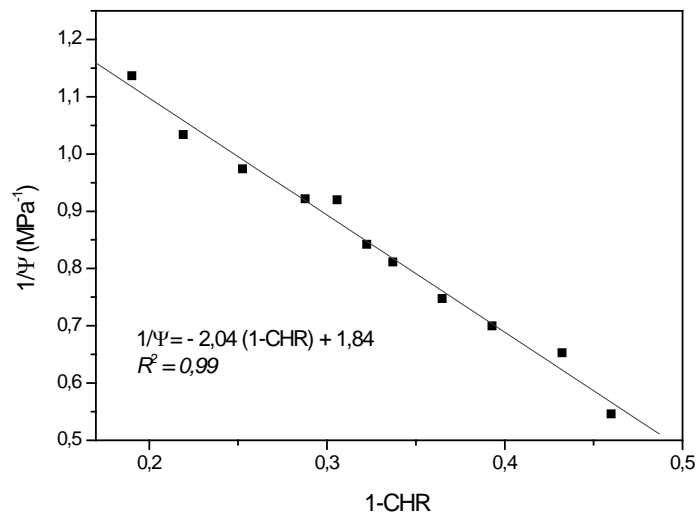


Figura 33. Potencial osmótico a plena turgencia (Ψ_s^{100}).

En la tabla 8, se presentan los parámetros hídricos calculados a partir de la curva presión-volumen.

Tabla 8. Parámetros hídricos de la especie *Cedrela odorata* calculados a partir de la curva presión-volumen.

Parámetros hídricos	Valor medio	Unidad
Contenido hídrico simplástico (CHS)	59±1,62	%
Contenido hídrico relativo a turgencia cero (CHR ⁰)	81±1,03	%
Potencial osmótico a plena turgencia (Ψ_s^{100})	0,54±0,05	MPa
Potencial osmótico a turgencia cero (Ψ_s^0)	0,87±0,14	MPa
Módulo de elasticidad de la pared celular (ε)	1,18±0,04	MPa

En cuanto a los parámetros hídricos calculados el contenido hídrico simplástico se encontró en un 59%, y el contenido hídrico relativo a turgencia cero resultó en un 81 %, esto indica que la planta inicia la plasmólisis celular con una pérdida de un 19 % del contenido hídrico relativo. El potencial osmótico a plena turgencia y a turgencia cero se encontró en valores de 0,54 y 0,87 respectivamente, los cuales permiten la absorción de agua y el mantenimiento de la turgencia celular.

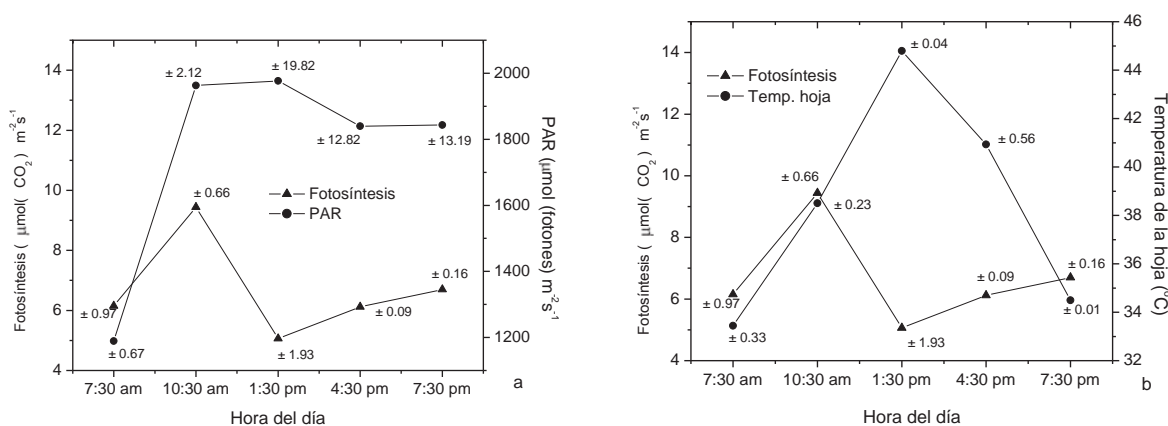
La especie *Cedrela odorata* mostró un valor promedio de elasticidad de la pared celular bajo (1,18 MPa), lo cual indica un ajuste elástico por lo que esta especie desarrolla mecanismos fisiológicos que le permiten mantener la turgencia celular en las condiciones del Valle del Yaqui, resultando eficiente en el uso del agua. Azcon-Bieto y Talón (2001), plantean que especies con menores módulos promedio de elasticidad de la pared celular son más tolerantes al estrés hídrico, al ser más elásticas sus células, ya que presentan una alta tasa de ajuste que les sirve para retener agua a diferentes potenciales hídricos.

Lenz *et al.* (2006), refieren que las paredes celulares más elásticas presentan menores valores de módulo de elasticidad de la pared celular, permitiendo el ajuste de la pared a medida que entra o sale agua de la célula manteniendo una presión constante fundamental para seguir con los diversos procesos fisiológicos de la planta. Por su parte Ruiz (1999), agrega que paredes celulares rígidas con altos módulos volumétricos de elasticidad no permiten tal ajuste y por lo tanto, no son capaces de mantener su presión, la cual no es suficiente para mantener la tasa de división celular y otros procesos de vital importancia para la planta.

Algunos investigadores han medido el módulo de elasticidad de la pared celular en algunas especies. Lenz *et al.* (2006), reportan para *Prosopis pallida* módulos de elasticidad de 16-24 MPa y Corcuera (2003), para el género *Quercus* valores entre 11-20 MPa. Si se comparan los valores obtenidos por estos autores se puede decir que la especie en estudio es más tolerante al estrés hídrico.

3.2.2 Medidas de intercambio gaseoso.

En la figura 34 (a,b,c,d), se muestra la variación diurna de la fotosíntesis en función de radiación fotosintéticamente activa (PAR), temperatura de la hoja, déficit de presión de vapor (DPV) y la conductancia estomática.



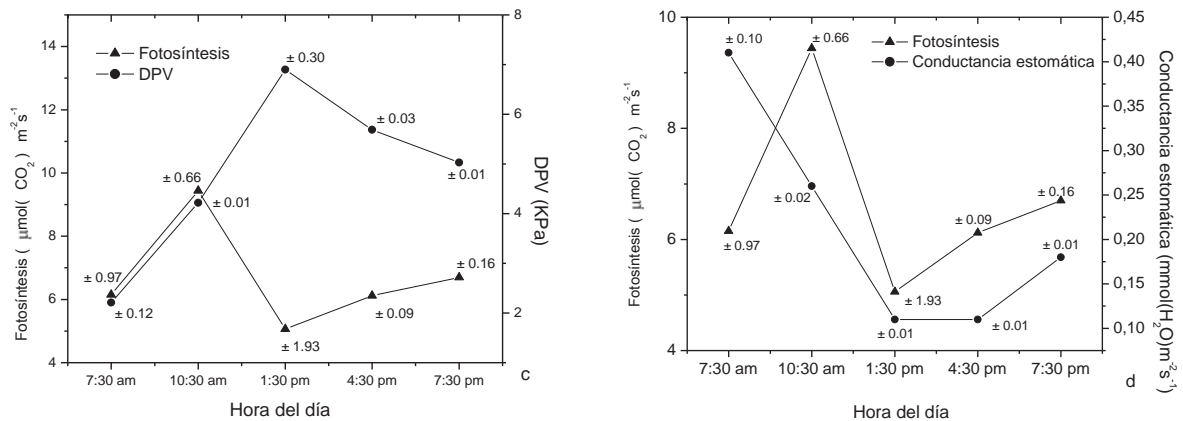


Figura 34 (a,b,c,d). Variación diurna de la fotosíntesis en función de las variables microclimáticas y la conductancia estomática.

Los resultados de la fotosíntesis, representados en la figura anterior, muestran que un incremento en la radiación fotosintéticamente activa (PAR), durante las horas de la mañana, afecta de forma diferente en la asimilación de CO₂, registrando tasas máximas de 9,8 μmol(CO₂)m⁻²s⁻¹. Al mediodía, a pesar de que se observa un incremento de la PAR, las tasas de fotosíntesis disminuyen considerablemente, lo cual pudiera estar asociado a un cierre parcial de los estomas o una fotoinhibición dinámica producto a las altas temperaturas. Taiz y Zeiger (2006), plantean que la fotoinhibición dinámica parece producirse normalmente al mediodía cuando las hojas están expuestas a los mayores niveles de luz y se corresponde con una reducción en la fijación de carbono.

Se evidencia que con la evolución del día continúa la asimilación de CO₂ con valores por encima de 7 μmol(CO₂)m⁻²s⁻¹ hasta el último registro a las 7:30 pm. Estos resultados difieren de los obtenidos por López *et al.* (2001), los cuales obtienen valores máximos de 14 μmol(CO₂)m⁻²s⁻¹ durante el día, con una tendencia a disminuir la asimilación de CO₂ con la evolución del día. Sin embargo, en *Cedrela odorata* bajo el régimen al cual está sometida la especie, la tendencia es al incremento en las tasas de fotosíntesis.

Se aprecia que un incremento del DPV y de la temperatura de la hoja próximo a los 38 °C no afecta el incremento de la fotosíntesis, por el contrario esta se ve favorecida, mientras que la elevación hasta los 45 °C produjo caídas de hasta $5 \mu\text{mol}(\text{CO}_2)\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$, asociado a un déficit hídrico del suelo que causa el cierre parcial de los estomas con una consecuente disminución de la conductancia estomática. Taiz y Zeiger (2006), plantean que un aumento en la temperatura de las hojas, durante el día, puede ser mucho más pronunciado en regiones áridas y semiáridas.

En la medida que la temperatura de la hoja disminuyó en las horas de la tarde se producen incrementos de la fotosíntesis y la conductancia estomática. El comportamiento de la fotosíntesis está dado por un aumento en la temperatura hasta llegar a un máximo a partir del cual la actividad decrece, coincidiendo con lo descrito por Langjun *et al.*, (2006). También Vázquez y Torres (1995), manifiestan que la actividad de la fotosíntesis está marcadamente afectada por la temperatura de las hojas.

La conductancia estomática, por su parte, resulta una variable de gran importancia ya que determina el momento en que se facilita el paso del CO_2 para el proceso de fotosíntesis en las plantas. En el desarrollo de las mediciones durante el día se destacan ligeras variaciones en la conductancia estomática, aunque marcadas en las horas del mediodía, presentando valores superiores a las 10:00 am. Es importante destacar, que en esta especie, bajo estas condiciones a las 7:30 pm correspondiente a la última medición diurna no se logra el control estomático, lo cual es un reflejo de las largas horas solares que se presentan en la región.

Donoso *et al.* (2011), obtuvieron resultados similares en un estudio sobre la respuesta fisiológica y crecimiento en plantas de *Quillaja saponaria* y *Cryptocarya alba* sometidas a restricción hídrica.

García *et al.* (2009), en un estudio con *Pinus caribaea* var. *caribaea* en las condiciones tropicales de Cuba, en particular de Pinar del Río, refieren que el mejor control estomático se logra alrededor de las 4:00 pm. Sin embargo, los resultados en esta especie y para esta zona son completamente diferentes reportándose los valores más bajos de conductancia en las horas del mediodía.

También Saquete y Lledó (2005), abordan el tema sobre el control estomático, enfatizando que la mayoría de las especies alcanzan el mayor control en horas de la tarde. Este comportamiento indica un favorecimiento en las tasas fotosintéticas.

En la figura 35 (a, b y c), se muestra la marcha diurna de la transpiración en correspondencia con las variables microclimáticas (DPV y temperatura de la hoja).

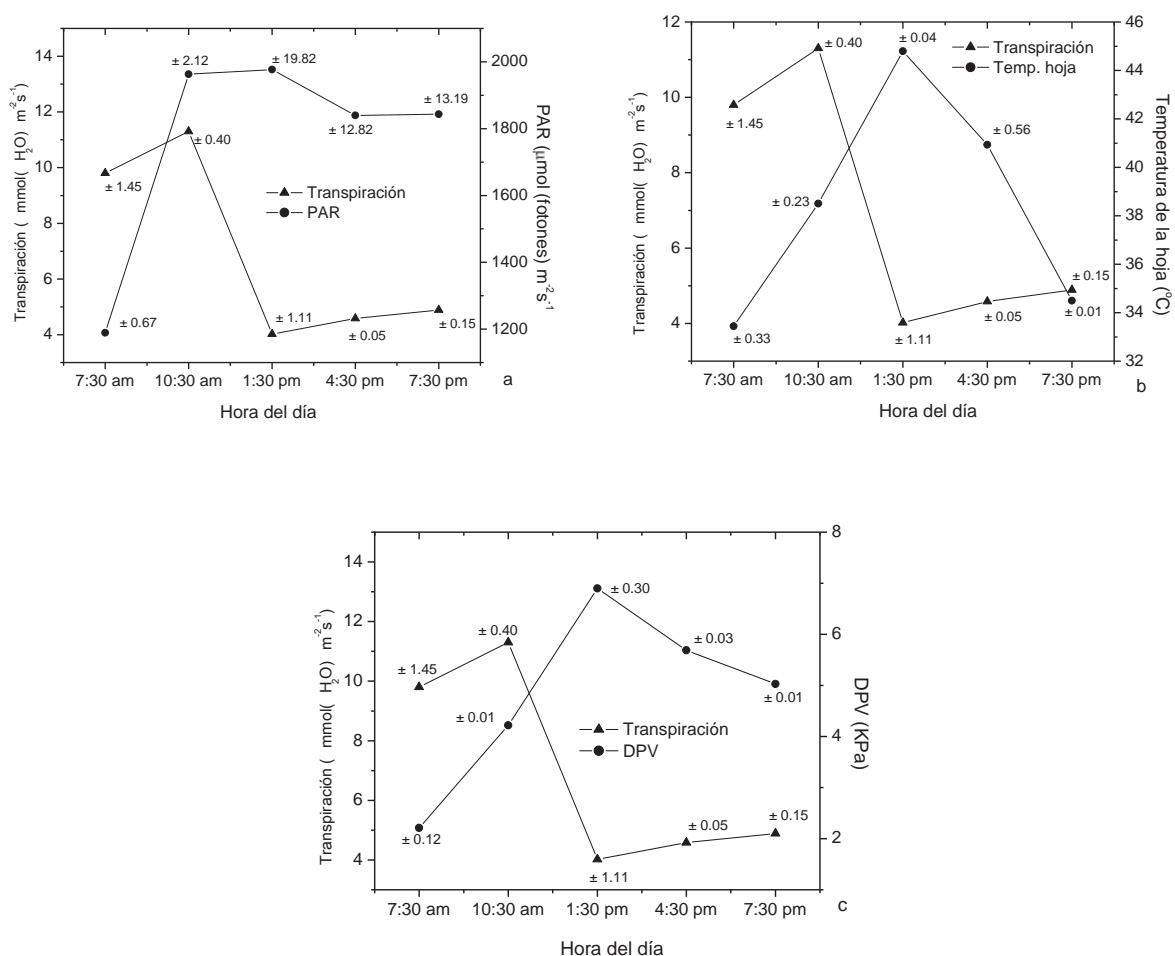


Figura 35 (a, b y c). Variación diurna de la transpiración en función de las variables microclimáticas.

En la misma se observa un comportamiento creciente desde las primeras horas solares, siendo mayores a las 10:30 am. En horas del mediodía, se aprecia que con un ligero aumento en la PAR, aumenta la temperatura de la hoja, el DPV y disminuye considerablemente las tasas de transpiración hasta 4,2 mmol (H₂O) m⁻²s⁻¹, situación

muy similar a lo ocurrido con la fotosíntesis, lo cual demuestra un cierre parcial de los estomas para evitar la pérdida excesiva de agua por transpiración a estas horas del día cuando las temperaturas resultan muy elevadas. López (2005), plantea que es común que ocurra cierre de estomas con temperaturas de 30 - 35 °C. Estos resultados coinciden con lo obtenido por Garnier y Berger (1987) y Damián *et al.* (2009), los cuales manifiestan una relación directa entre las tasas de transpiración y las variables microclimáticas. Esto demuestra que las tasas de transpiración cambian debido a variaciones en las condiciones ambientales (intensidad luminosa, temperatura, humedad relativa y el DPV que se dan durante el día. Según Johsen y Major (2004), la velocidad de transpiración depende tanto de la sequedad del aire (DPV) como de la apertura de los estomas.

López (2005), refiere que el patrón diario de transpiración varía durante el día y estacionalmente con relación a la apertura de los estomas, lo cual está en función de las variaciones ambientales. La transpiración aumenta conforme incrementa la temperatura. Si el árbol pierde agua durante el día, las células oclusivas se tornan flácidas, de esta manera los estomas se cierran parcial o totalmente y por tanto disminuye la transpiración (aún en árboles sanos y un suelo con suficiente humedad) puede ocurrir flacidez de las células oclusivas, con el consecuente cierre de estomas. Si las células oclusivas recobran su turgencia, los estomas se abren otra vez y recupera la tasa de transpiración para disminuir progresivamente por la tarde. Esto refleja que aunque se garanticen las condiciones de humedad necesarias en el suelo, en este caso riego cada tercer día, los procesos fisiológicos de la planta pueden verse afectados en determinadas horas del día por las condiciones microclimáticas, aunque al estar sometidas a este régimen hídrico facilita su rápida recuperación.

La transpiración acentuada por elevadas temperaturas puede producir una marchitez temporal que ocasione la muerte de la planta. Temperaturas muy elevadas motivan que la planta consuma sus propias sustancias de reserva, también provocan alteraciones en las funciones fisiológicas, así por ejemplo, se eliminan con mayor dificultad los productos finales metabólicos pudiendo provocar el autoenvejecimiento de las células (Villalobos *et al.*, 2002).

Estos criterios denotan la importancia de monitorear las tasas de transpiración, máximo cuando se trata de una zona semiárida donde se reportan temperaturas por encima de los 40 °C.

Según González (1991), la tasa de transpiración foliar prácticamente es nula cuando el potencial hídrico baja debido a que la conductancia estomática decrece rápidamente conforme el déficit hídrico aumenta.

3.2.3 Comportamiento del crecimiento de *Cedrela odorata*

En el epígrafe anterior, se demostró que las variaciones en las condiciones ambientales afectan considerablemente los procesos fisiológicos relacionados con la fotosíntesis y la transpiración. Sin embargo, esto a su vez puede llegar a imponer serias restricciones para el crecimiento y desarrollo vegetativo. En la figura 36, se muestra el comportamiento del crecimiento de *Cedrela odorata* para el período evaluado (2009/2012), que incluye hasta el cuarto año de edad de la plantación. En la misma, se distingue para esta primera etapa de crecimiento, un aumento progresivo a ritmos muy intensos, desde los primeros meses de plantada hasta la evaluación final, aunque se observan periodos bien marcados de cierta estabilidad, con ligeros incrementos, los cuales se corresponden con la estación invernal (noviembre a diciembre) donde las plantas inician su reposo vegetativo o letargo en la fecha correspondiente al periodo de estrés, debido a que las mismas en su programación genética muestran un ritmo endógeno sincronizado con el ciclo anual del clima. Sin embargo, en los meses de la estación de verano generalmente de abril a octubre, se aprecian incrementos considerables en las variables altura y diámetro, lo cual se debe a un aumento de las temperaturas que al parecer favorecen el crecimiento de la especie. Este crecimiento acelerado pudiera estar asociado al mantenimiento de la turgencia celular. Al respecto Matthews *et al.* (1984), demostraron que existe una relación directa entre la expansión de la hoja y la turgencia celular.

Se obtuvieron valores promedios de altura y diámetro para el primer año de plantada de 2,35 m y 2,34 cm; para el segundo año 3,88 m y 3,02 cm; para el tercer año 4,53 m y 4,84 cm y para el cuarto año de 6,51 m y 6,80 cm respectivamente.

Estos resultados, aún en los periodos donde la planta no cubre todas sus necesidades hídricas, son superiores a lo reportado Ramírez (2005), en un estudio sobre evaluación del crecimiento de una plantación comercial de *Cedrela odorata* manejada intensivamente en el sur de Tamaulipas, México.

Betancourt (1987), reporta que en un suelo bueno y adecuada iluminación se obtiene un crecimiento entre 1,3 y 1,8 m de altura y 1,3 a 1,6 cm de diámetro durante los primeros años para esta especie. Lo que indica que el agua es un recurso necesario para el crecimiento y desarrollo de esta especie bajo condiciones semiáridas.

Es notable que los mayores incrementos se obtuvieron durante el primer año, sin embargo en el segundo año (2010) se obtuvo incrementos de solo 1,53 m de altura y 0,68 cm de diámetro, ya que los árboles comenzaron a ramificarse y estuvieron sometidos a prolongados periodos de estrés hídrico. En el tercer año de medición (2011) las plantas incrementaron 0,65 m de altura y 1,82 cm de diámetro, debido fundamentalmente, al daño físico que sufrieron los meristemos apicales de las plantas por la helada tardía que se produjo en febrero del 2011 con temperaturas mínimas de -2 °C, durante seis horas continuas en tres días consecutivos, y para la última medición (julio 2012) después de estabilizada la frecuencia de riego cada tercer día desde agosto del año anterior se obtuvieron incrementos maderables de 1,98 m de altura y 1,96 cm de diámetro. De igual forma, si se analiza el periodo de evaluación de septiembre del 2011 hasta julio del 2012 correspondiente a la mitigación del estrés hídrico los incrementos fueron muy superiores (2,41 m de altura y 1,98 cm de diámetro). Estos resultados indican que las plantas responden favorablemente al crecimiento una vez que se mitiga el estrés hídrico con la dosis y frecuencia requerida de riego.

Taiz y Zeiger (2006), plantean que por cada gramo de materia orgánica producida por la planta, las raíces absorben aproximadamente 500 g de agua, transportados y liberados en la atmósfera y cualquier pequeño desequilibrio de este flujo puede causar un déficit hídrico.

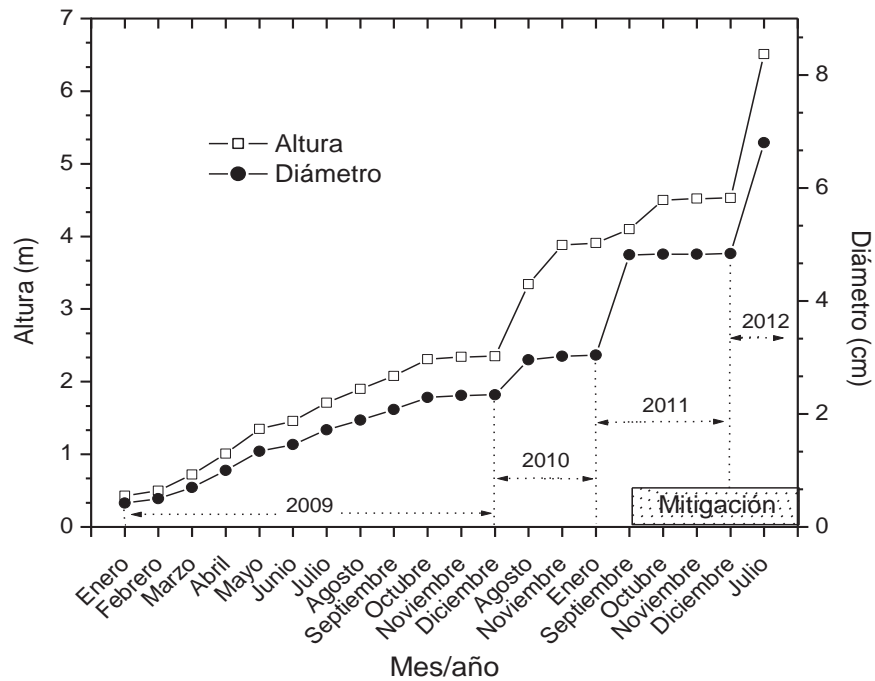


Figura 36. Curvas de crecimiento en altura y diámetro para diferentes periodos estacionales.

Camejo *et al.* (2005), Langjun *et al.* (2006) y Waren (2007), plantean que las plantas presentan una curva de respuesta a la temperatura con un óptimo que determina una tasa de crecimiento máxima y un intervalo de temperatura máxima y mínima fuera del cual el desarrollo se detiene. Los valores de temperaturas máximas y mínimas críticas y óptimas son variables, dependiendo de la especie y de la etapa de desarrollo en estudio.

Por otra parte López (2005), plantea que la temperatura óptima para el crecimiento vegetal está ajustada a ritmos ambientales (fluctuaciones diarias y estacionales). El termoperiodo es referido al balance entre las fluctuaciones de temperaturas (altas y bajas) que se establecen como constantes térmicas para que pueda ocurrir el crecimiento. En el caso de estudio, se demuestra que la alternancia de temperaturas a lo largo de cada estación presenta un efecto marcado sobre los incrementos de altura y diámetro en *Cedrela odorata*, mostrando las plantas un mayor crecimiento cuando

las temperaturas son elevadas, lo cual se evidencia entre los meses de julio y agosto con temperaturas máximas de hasta 42 °C y mínimas de 22 °C, indicando el rango de temperatura adecuado para obtener un mayor incremento, siempre y cuando se le garanticen sus necesidades hídricas, aunque también pudiera estar asociado a un fotoperiodo largo de 18 horas luz aproximadamente, típico en esta región.

Taiz y Zeiger (2006), refieren que cuando la temperatura es muy baja, el citoplasma celular se torna a un estado de gel sólido, y disminuye el transporte de membrana, la respiración, la fotosíntesis, entre otros.

3.2.4 Propuesta de paquete tecnológico para la programación de riego en plantaciones de *Cedrela odorata*.

La propuesta de paquete tecnológico para la programación de riego en plantaciones de *Cedrela odorata* está sustentado en la caracterización de la demanda hídrica de la especie, considerando las necesidades en función de la edad de la plantación y la respuesta ecofisiológica de la misma una vez estabilizado el riego (192 litros de agua cada tres días/árbol), además del análisis del ritmo de crecimiento en diferentes edades y periodos estacionales. Esto permitió elaborar un paquete tecnológico para la programación de riegos el cual garantizará una mayor productividad en las plantaciones. A continuación se describen los resultados del paquete tecnológico:

El total de agua que se requiere para abastecer una plantación de *Cedrela odorata* en las condiciones medioambientales del Valle del Yaqui es de 13,225 m³/ha (1,322 mm), los cuales se distribuirán de la siguiente manera:

Durante el verano se establecerá una frecuencia de riego de 192 litros de agua cada tercer día, programados durante 29 semanas entre los meses de mayo a octubre, en goteros de un gasto de agua de cuatro litros por hora; cada árbol tendrá dos goteros durante 24 horas (192 litros) y cada semana tendrá un gasto de 384 litros de agua por árbol (426 m³) para un total de 12,373 m³ (1,237 mm).

En el mes de noviembre (periodo invernal), se reducirá la dosis de riego a 192 litros cada siete días durante cuatro semanas. El gasto de agua será de 213 m³ para un total de 852 m³ (85 mm) con el fin de inducir lentamente el estrés hídrico que coincidirá con la dormancia invernal de las plantas (31 semanas completas de 426 m³).

En los meses comprendidos entre diciembre y abril se suspende el riego ya que las plantas se mantendrán en reposo vegetativo hasta la nueva brotación que aparecerá en el mes de mayo cuando inicie el nuevo ciclo de riego. Es importante considerar que las necesidades hídricas de la especie no serán las mismas que en las primeras etapas de su crecimiento.

Después del primer aclareo se eliminará el 50 % de los individuos, reduciendo también el gasto por hectárea, hasta el segundo aclareo del 25 % y finalmente quede una población de 277 árboles/ha para el aprovechamiento final.

La evapotranspiración del cultivo fue de 1,320 mm para esta zona del Valle del Yaqui, demostrándose la precisión de estos parámetros según se explicó en el epígrafe 2.2.6 del capítulo anterior, por lo que la planta solamente utilizará la cantidad de agua que requiere para cumplir sus funciones vitales, permitiendo un uso sostenible de los recursos hídricos, con una respuesta favorable durante la etapa de crecimiento, obteniendo elevados incrementos maderables.

3.2.5 Valoración económica

El costo de producción en una plantación forestal de *Cedrela odorata* en pesos mexicanos, con una densidad de 1 111 árboles/ha en las condiciones del Valle del Yaqui para los propietarios de terrenos, se distribuye de manera general en los siguientes rubros:

- Producción de planta en contenedores..... 4 000
- Sistema de riego por goteo 30 000
- Preparación del terreno..... 3 000
- Plantación y siembra..... 1 111
- Mantenimiento en 4 años.....4 000
- Cuota de agua en 4 años..... 5 200
-

Inversión total en 4 años.....44 311 pesos mexicanos
(3,478 USD)

Los programas del gobierno federal destinados a las zonas agrícolas por parte de la Secretaría de Agricultura y Medioambiente (programas de la Comisión Nacional Forestal) se asignan de la siguiente manera: Costo total de producción de planta, subsidio de 50 % en riego por goteo y apoyo del Programa PRO-ARBOL por establecimiento y mantenimiento (7 000 pesos), teniendo un ahorro de 26 000 pesos mexicanos. El costo de producción en 4 años para el productor con subsidios del gobierno es de 18 311 pesos mexicanos por hectárea (1 437 USD).

La tasa interna de retorno a través del sistema bancario es de 37,68 % para plantaciones forestales comerciales sin subsidio para proyectos de 10 años, pero con apoyos del gobierno aumenta a 46,42 %, lo que hace atractivo para el sistema bancario apoyar proyectos forestales debido a que las ventas por aclareos generarán ingresos importantes que solventarán los créditos en el largo plazo.

En el caso de maderas preciosas, como es el caso de *Cedrela odorata* los precios de acuerdo a la bolsa de materias primas de Chicago, puede ascender a 2,500 dólares por metro cúbico de madera aserrada y estufada con calidad de exportación. Actualmente las maderas preciosas tienen un incremento de 1,03 % anual.

Los ingresos estimados pueden ser de 355,000 dólares por hectárea al final del turno de 20 años, esto representa un impacto económico de 17,750 dólares por hectárea anual. También se pueden recibir ingresos adicionales de los programas de servicios ambientales por captura de CO₂, además de otros beneficios económicos por la creación de actividades productivas encadenadas y la generación de empleos.

En sentido general la valoración económica a partir de los indicadores que lo representan indica que independientemente de los altos costos de la plantación por el sistema de riego por goteo, los beneficios económicos son muy superiores.

3.3 Conclusiones parciales

- Los potenciales hídricos en *Cedrela odorata* mostraron diferencias significativas en plantas sometidas a riego cada tercer día y estresadas y al alba con el mediodía y atardecer, no siendo así entre estas últimas medidas.
- La mitigación del estrés hídrico en las plantaciones de *Cedrela odorata* es un reflejo del estado hídrico de la especie, independientemente de que se encuentre en una zona semiárida, lo cual permitió valores bajos de potencial hídrico desde -0,9 hasta -1,2 MPa.
- El módulo de elasticidad de la pared celular resultó bajo (1,18 MPa), lo cual indica que esta especie presenta mecanismos fisiológicos que le permiten mantener la turgencia celular en las condiciones extremas del Valle del Yaqui, resultando ser eficiente para el uso del agua.
- Las medidas de intercambio gaseoso muestran variaciones diurnas, siendo un reflejo de las condiciones microclimáticas, con determinadas afectaciones en los procesos fisiológicos durante las horas del mediodía y una consecuente recuperación al estar sometidas a un régimen adecuado de riego.
- La especie *Cedrela odorata* mostró un ritmo de crecimiento acelerado durante la etapa de evaluación (6,5 m de altura y 6,80 cm de diámetro), con incrementos superiores en el periodo de mitigación de estrés.
- Se elaboró un paquete tecnológico para la programación del riego de las plantaciones de *Cedrela odorata* en los diferentes periodos estacionales en correspondencia con las necesidades hídricas de la especie.

CONCLUSIONES GENERALES

- La especie *Cedrela odorata* muestra niveles de variación en cuanto demanda hídrica en los diferentes periodos estaciones, con un requerimiento de 192 litros cada tres días durante el verano.
- Se demostró a través del potencial hídrico y sus componentes que la especie *Cedrela odorata* presenta mecanismos fisiológicos que le permiten mantener la turgencia celular en las condiciones de suelo vertisol compactado de una zona semiárida del Valle del Yaqui.
- La respuesta fisiológica de las plantas, expresado a través de las medidas de intercambio gaseoso (fotosíntesis, transpiración y conductancia estomática) muestran un patrón de variación diurna determinado por las condiciones microclimáticas de la región (déficit de presión de vapor, temperatura de la hoja y radiación fotosintéticamente activa), lo cual responde favorablemente mediante la frecuencia de riego establecida.
- El crecimiento de la especie, al cuarto año de plantada, muestra una tendencia ascendente a ritmos acelerados en sincronía con los periodos estacionales, demostrándose incrementos superiores con la mitigación del estrés hídrico (2,41 m de altura y 1,98 cm de diámetro).
- La propuesta de paquete tecnológico para la programación del riego, sustentado en bases ecofisiológicas, garantizará la productividad de las plantaciones de *Cedrela odorata*.

RECOMENDACIONES

- Continuar con el monitoreo y caracterización de las variables fisiológicas relacionadas con la productividad de la especie *Cedrela odorata*.
- Determinar las potencialidades productivas de la especie en diferentes tipos de suelos.
- Poner a disposición de los productores del Valle del Yaqui una herramienta que les permita la programación de los riegos, como alternativa para una mayor productividad y diversificación en la zona agrícola.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar C., J.M y Aguilar C., M.A. Árboles de la Biosfera Maya Petén, Guía para las especies del Parque Nacional Tikal. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, Escuela de Biología, Centro de Estudios Conservacionistas (CECON). San Carlos, Guatemala. 272, 1992.
- Aguilar G., J.I. Relación de unos aspectos de la flora útil de Guatemala. Tipografía Nacional de Guatemala, Segunda Edición. San Carlos, Guatemala 383, 1966.
- AGROSON. Red de estaciones meteorológicas del Valle del Yaqui, Sonora, México. Disponible <http://www.agroson.org.mx>. Consultado diciembre 2010.
- Ahmad, S., N.A.R. Ahamad and Hamid, M. Effect of high temperature stress on wheat productive growth. J. Agri. Res. (27) 307-313, 1989.
- Álvarez, O. P. Curso de silvicultura de plantaciones y bosques naturales (MPFN-7, FAO). Lecciones y documentos de capacitación. 70, 2011
- American Public Health Association; American Water Works Association; Water Pollution Control Federation. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 18 (ed). Washington, USA, 1992.
- Azcon-Bieto, J. y Talón, M. Fundamentos de fisiología vegetal. Editorial Interamericana McGraw-Hill. Barcelona, España. 420, 2001.
- Bascopé, F. El género *Cedrela* en América. Instituto Forestal Latinoamericano de Investigación y Capacitación. Turrialba, Costa Rica. (2) 26, 1957.
- Bertoni, V. R. Trabajos realizados sobre plantaciones forestales, en el campo Experimental Forestal Tropical “El Tormento”. Reunión Nacional de Plantaciones Forestales. INIF. Pub. Esp. México, D.F. (13) 287–291, 1978.
- Betancourt, B.A. Silvicultura Especial de de Árboles Maderables Tropicales. Nueva edición. Editorial Científico-Técnica, Ciudad de La Habana. Cuba. 427, 1999.

- Betancourt, B.A. Silvicultura especial de árboles maderables tropicales. Editorial Científico Técnico. Ciudad de la Habana, Cuba. 92-109, 1987.
- Buchinger, M. y Falcone, R. Las Meliáceas argentinas. *Revista Invest. Forest.* (1) 9-58, 1957.
- Bruner, S.C.; L.C. Scaramuzza; A. R. Otero. Catálogo de los insectos que atacan a las plantas económicas de Cuba, 2a. ed., Academia de Ciencias de Cuba, 1975.
- Calvo, J. El estado de la caoba en Mesoamérica: Memorias del Taller. PROARCAS-CAPA. Centro Científico Tropical. Turrialba, Costa Rica, 2000.
- Camejo, D., Rodríguez, M., Angeles, M.J.M., Dell, A. y Torrecillas, A.JJ. High temperature effects on photosynthetic activity of two tomatoes cultivars with different heat susceptibility. *J. Plant Physiology.* (162) 281-289, 2005.
- Carpio, M. Maderas de Costa Rica, 150 Especies forestales. Editorial de la Universidad de Costa Rica. 74, 2002.
- Carpio, M.I.M. Maderas de Costa Rica, 150 Especies Forestales. Costa Rica, Editorial de la Universidad de Costa Rica. 338, 1992.
- CONABIO. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. La diversidad biológica de México: Estudio de País. Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad. México. 15, 1998.
- Cohen, M. Funcionamiento hídrico y producción frutal en zonas semiáridas: Aplicación al manejo de riego. Memoria Universidad de Lleida. Escola Técnica Superior d' Enginyeria Agraria. 298, 1994.
- Conejero, W., Ortuño, M.F., Mellisho, C.D. y Torrecillas, A. Influence of crop load on maximum daily trunk shrinkage reference equations for irrigation scheduling of early maturing peach trees. *Agric. Water Manage.* 97 (2), 333–338, 2007.
- Corcuera L. Comparación de dos métodos para generar curvas presión volumen en especies del género *Quercus*. *Invest. Agrar.: Sist. Recur. For.* 12 (1) 111-121, 2003.

- Cordero, J., Boshier, D. y Barrance, A. Árboles de Centroamérica: Un manual para extensionistas. CATIE, Turrialba, Costa Rica. 452, 2003
- Costas, R. Proyectos y asesoramiento en medio ambiente 2007. Disponible en: <http://www.cienciaybiologia.com/ecologia/autoecologia.htm>. Consultado abril, 2008.
- Damián, N.A., Ramírez, R.I., Peña. V.B., Díaz V.G. y González H.V. Características del intercambio de gases en hojas de *Psidium guajava* L. Revista Chapingo. Serie horticultura. Universidad Autónoma Chapingo, México. 15 (2) 119-126, 2009.
- De la Peña, T.I., Llerena, V.F. Manual del uso y Manejo del agua de riego, Ed. Futura S.A. Texcoco, Estado de México. 59, 2001.
- Del Risco, E. Tipología de Bosques. Documentos preparados para curso de Tipología de Bosques en la Maestría en Ciencias Forestales. Universidad de Pinar del Río, Pinar del Río, Cuba. (Documento inédito). 7, 2000.
- Deslauriers, A., Rossi, S., Turcotte, A., Morin, H. and Krause, C. A three-step procedure in SAS to analyze the time series from automatic dendrometers. Département des sciences fondamentales, Université du québec à Chicoutimi, Canada. (29) 151-161, 2011.
- Deslauriers, A., Rossi, S. and Anfodillo, T. Daily weather response of balsam fir (*Abies balsamea* (L.) mill.) stem radius increment from dendrometer analysis in the boreal forests of Quebec, Canada. (17) 477-484, 2008a.
- Donoso, S. Peña K., Pacheco C., Luna G. y Aguirre A. Physiological and growth response in *Quillaja saponaria* and *Cryptocarya alba* plants under restricted water conditions. Respuesta fisiológica y de crecimiento en plantas de *Quillaja saponaria* y *Cryptocarya alba* sometidas a restricción hídrica. Revista Bosque 32(2). 187-195, 2011.
- Drew, D.M., Downes, G., O'Grady, A.P., Read and J., Worledge, D. High resolution temporal variation in wood properties in irrigated and non-irrigated *Eucalyptus globulus*. Annals of Forest Science (66) 406, 2009b.

- Drew, D.M., Downes, G., Grzeskowiak, V. and Naidoo, T. Differences in daily stem size variation and growth in two hybrid eucalypt clones. *Trees* (23) 585–595, 2009a.
- Drew, D.M., O’Grady, A.P., Downes, G., Read and J., Worledge, D. Daily patterns of stem size variation in irrigated and unirrigated *Eucalyptus globulus*. *Tree Physiology*. Victoria, Canada (28) 1573–1581, 2008.
- Escarré, A., Bernabé, A., Aldeguer, M., Verdú, R., Escarré, R. y Agulló, A. A. Pemi. *Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente*. Santillana. SA. España. 383, 1997.
- FAO. Situación de los bosques del mundo. La situación de los recursos forestales-análisis regional. Roma, Italia. 18, 2011.
- FAO. Evaluación de los recursos forestales mundiales. Funciones productivas de los recursos forestales. (28) 89-90, 2010.
- FAO. Situación de los bosques del mundo. Organización para la Agricultura y la Alimentación de las Naciones Unidas. Roma, Italia. 170, 2009.
- FAO. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO riego y drenaje, No. 56. Roma. Italia, 2006b.
- FAO. Evaluación de los recursos forestales mundiales. Montes. Num. 147. Roma, Italia. 351, 2006a.
- FAO. Perspectivas mundiales del suministro futuro de madera procedente de plantaciones forestales. Dirección de políticas forestales. Roma, Italia, 2000.
- FRA. Forest Resources Assessments Program. Guidelines for assessments in tropical and subtropical countries, E/F/S/PFRA. 43, 2000.
- Fereres, E., Goldhamer, D., Cohen, M., Girona, J., y Mata, M. Continuous trunk diameter recording can reveal water stress in peach trees. *California, Agriculture U.S.A.* 53 (4): 21-25, 1999.

- Fernández M. D., Orgaz F., Fereres E., López J.C., Céspedes A., Pérez J., Bonachela S. y Gallardo M. Programación del riego de cultivos hortícolas bajo invernadero en el sudeste español. Edición: CAJAMAR (Caja Rural de Almería y Málaga). Estación Experimental las Almerillas, España, 2001.
- García, Y., Flores, J.; Geada, G. y Escarré, A. Relación de atributos ecofisiológicos y características ambientales de ocho localidades de la especie vulnerable *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* en Pinar del Río. Revista de Ciencia y Tecnología de América. Journal of Science and Technology of the Americas. Intenciencia. 33 (12) 12, 2009.
- Garnier, E. y Berger, A. The influence of drought on stomal conductance and water potential on peach trees growing in the field. SC. Hort. (32) 249-263, 1987.
- Genard, M., Fishman, S., Vecambre, G., Huguet, J. G., Bussi, C., Besset, J. and Habib, R. Biological analysis of stem and root diameter variation in woody plants. Plant physiol. (126) 188- 202, 2001.
- Giovannelli, A., Deslauriers, A., Fragnelli, G., Scaletti, L., Castro, G. and Rossi, S., Crivellaro, A. Evaluation of drought response of two poplar clones (*Populusxcanadensis* Mönch 'I-214' and *P. deltoides* Marsh. 'Dvina') through high resolution analysis of stem growth. Journal of Experimental Botany (58) 2673–2683, 2007.
- Gispert, C., Castelló, R., Cuerda, J., Guisán, S., Ibáñez, J., Navarro F., Oliva M. y Olivar J. Biblioteca agrícola y ganadera. Los fundamentos de la agricultura. Editorial océano. España. 45, 1983.
- Goldhamer, D.A. y Fereres, E. Irrigation scheduling protocols using continuously recorder trunk diameter measurements. Irrigation science, (20) 115-125, 2001.
- Goldhamer, D. A., Fereres, E., Girona, J., Mata, M. and Cohen, M. Sensitivity of continuous and discrete plant and soil water status monitoring in peach trees subjected to deficit irrigation. Journal of the American Society for Horticultural Science. (124) 37-44, 1999.

- González, D. Descripción anatómica de once especies forestales de uso industrial en Panamá. Costa Rica, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Proyecto Cultivo de Arboles de Uso Múltiple (MADELE A). 61, 1991.
- Graves, W. R., Joy, R. J. and Dana, M. N. Water use and growth of honey locust and tree of heaven at high root zone temperature. Hort. Sci. (26) 1309-1312, 1991.
- Hanson, R.B., Orloff, S. and Peters, D. Monitoring soil moisture helps refine irrigation management California Agriculture. (54) 38-42, 2000.
- Herrera, Z; Lanuza, B. Cedro. Afiche en Revista Forestal Centroamericana. CATIE, Turrialba, Costa Rica. (21) 447-452, 1997.
- INE–SEMARNAT. Instituto Nacional de Ecología. Secretaría del Medioambiente y Recursos Naturales. Balance del Programa Nacional de Áreas Naturales Protegidas. México, (55) 2000.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadísticas Geografía e Informática. Gobierno de la República. Anuario Estadístico. Sonora, México, 2000.
- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). *Cedrela odorata*. Catalogo de paquetes tecnológicos de plantaciones forestales. Ciencia forestal. 5 (28) 64. México, 1998.
- IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Forth Assessment Report of the IPCC. 1268, 2007.
- Jones, H.G. Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant based methods Journal of Experimental Botany. (55) 2427-2496, 2004.
- Johnsen, K.H y Major, J.E. Técnicas ecofisiológicas en la evaluación de germoplasma. Manejo de Recursos genéticos forestales. Universidad Autónoma de Chapingo, México. Comisión Nacional Forestal. 159, 2004.

- Krepkowski, J. Braüning, A. and Gebrekirstos, A. Growth dynamics and potential for cross dating and multi century climate reconstruction of *Podocarpus falcatus* in Ethiopia. *Dendrochronologia*. Institute de geography. University of Erlangen Nuremberg, Kochstr, Germany. (30) 1-9, 2012.
- Kubiske, M. E. and Abrams M.D. Seasonal, diurnal and rehydration induced-variation of curves pressure-volume relation in *Pseudotsuga menziesii*. *Physiol. Plantarum* (83)107-116, 1991.
- Langjun, C., Jianlong, L., Yamin, F., Sheng, X. and Zhen, Z. High temperature effects on photosynthesis, PSII functionality and antioxidant activity of two *Festuca arundinaceae* cultivars with different susceptibility. *Botanical Studies*. (47) 61-69, 2006.
- Lenz, T., Wright, I. and Westoby, M. Interrelations among pressure–volume curve traits across species and water availability gradients. *Physiologia Plantarum*. (127) 423–433, 2006.
- Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable. Diario Oficial de la Federación. México, 2003.
- López, J.C., Riaño, M.N. y López, Y.F. Características fotosintéticas de cinco especies forestales. Simposio internacional Medición y monitoreo de captura de carbono en ecosistemas forestales. Valdivia, Chile. 7, 2011.
- López, R.G.F. Ecofisiología de árboles. Universidad Autónoma de Chapingo. primera edición. Texcoco, Estado de México, México. 360. 2005
- Martín, A.N. Tabla de interpretación de análisis de suelo. Universidad Agraria de La Habana. La Habana, Cuba. 14, 2000.
- Martínez, R.R., Azpiroz, R.H.S., Rodríguez de la O, J.L., Cetina, A.M. y Gutierrez, E.M.A. Importancia de las plantaciones forestales de Eucalyptus, Ra Ximahi, 2(3) 816. 2006.
- Matthews, M.A., Van Volkenburghb, E. and Boyer, J.S. Acclimation of leaf growth to low water potentials in sun flower. *Plant Cell Environ*: (7) 199-206, 1984.

- Medina, D., Gómez, R. y Windler, J. Manejo del riego del aguacate mediante el uso de dendrómetros. Proceedings V World Avocado Congress (Actas V Congreso Mundial del Aguacate). 273-281, 2003.
- Montagnini, F. Savia. Red Latinoamericana de Bosques (RLB) y Red Forestal Amazónica, 2003.
- Moreno, F., Ortuño, M.F., García O.Y.; Alarcón J.J., Conejero, W., Nicolás E.; Fernández J.E. y Martín, P.M.J., Torrecillas. Estado actual de la programación del riego en limonero mediante medidas del estado hídrico. Fundación para el Fomento de la Ingeniería del agua. Sevilla, España. 14 (3) 216-221, 2007.
- Mybur, P.A. Response of *vitis vinnifera* L. cv. Barlinka/Ramsey to soil water depletions levels with particular reference to trunk growth parameters. S. Afr. J. Enol. Vitic. (17) 3-14, 1996.
- NMX-AA-073-SCFI. Norma Mexicana para la determinación de cloruros totales en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. México, 2001.
- NMX-AA-008-SCFI. Norma Mexicana para la determinación del pH. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. México, 2000.
- NMX-AA-093-SCFI-2000. Norma Mexicana para la determinación de la conductividad electrolítica. Secretaría de Comercio y Fomento industrial. Gobierno de la República. México, 2000.
- NMX-AA-074. Norma Mexicana para la determinación del ion Sulfato. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. México 1981.
- Ochoa, E.X.M., Cantúa, A.J.A., Montoya, C.L. y Aguilera, M.N.A. Guía para producir soya en el sur de Sonora. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Centro de Investigación Regional del Noroeste, Campo Experimental Norman E. Borlaug, Sonora, México. 6-9, 2011.
- OIMT. Organización Internacional de Maderas Tropicales. Estado de la ordenación de bosques tropicales. Informe de síntesis. Revista Actualidad Forestal Tropical. No.1. Edición Especial. 4, 2006.

- Ortíz, E.J.E., Ramírez, D.J.M., Valdez, G.B. y Félix, V.P. Monitoreo de la Humedad del suelo y Programa de Riego en Naranja (*Citrus sinensis*) bajo Riego por Goteo en el Valle del Yaqui, Sonora. INIFAP. México. 12, 2010.
- Ortíz, E.J.E., Cortez, J.J.M. y Valencia, P.F. Manejo de riegos para los principales cultivos del sur de Sonora. Folleto técnico No. 51. INIFAP. México. 15, 2003.
- Ortiz, M. I. Anual Report, Sistemas de teledetección para salvar los ecosistemas. CYMMIT. México. 25, 2001.
- Ortuño, M.F., García O.Y., Conejero, W., Ruiz, S.M.C., Alarcón, J.J y Torrecillas, A. Stem and leaf water potential, gas exchange, sap flow and trunk diameter fluctuation for detecting water stress in lemon trees. Trees structure and function. (20) 1-8, 2006 a.
- Ortuño, M.F., García O.Y., Conejero, W., Ruiz, S.M.C., Mounzer, O., Alarcón, J.J y Torrecillas, A. Relationships between climatic variables and sap flow, stem water potential and maximum daily trunk shrinkage in lemon trees. Plants and soil. (279) 229-242, 2006 b.
- Paladinez, C.E. Desarrollo de protocolo de propagación In vitro para *Cedrela odorata* L. Universidad Técnica Estatal de Quevedo. Facultad de Ciencias Ambientales. Escuela de Ingeniería Forestal. Quevedo, Los Ríos, Ecuador. 24, 2011.
- Pardos, J.A. Fisiología vegetal. Fisiología de plantas sometidas al estrés. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. Universidad Politécnica de Madrid, España. 350, 1985.
- Pennington, T., D. y Sarukhan, J. Manual para la identificación de campo de los principales árboles tropicales de México. INIF. México. 413, 1968.
- Polania J.A.S., Mejía de T.L. y Rodríguez A. Curva Presión Volumen de la caña de azúcar variedad CC 8592 en condiciones del Valle del Cauca. Acta Agronómica, (52)1-4, 71-76, 2003.

- Ramírez, D.J.M. Variación estacional de la calidad y tamaño de fruta de naranja valencia en el Valle del Yaqui, Sonora. Folleto técnico No. 67. SAGARPA-INIFAP. Campo Experimental Valle del Yaqui. Sonora, México. 14, 2009.
- Ramírez, G.C. Evaluación del crecimiento de una plantación comercial de cedro rojo (*Cedrela odorata* L.) manejada intensivamente en el sur de Tamaulipas. INIFAP- Chapingo, México, 2005.
- Roig, M.J.T. Diccionario Botánico de Nombres Vulgares Cubanos. Tercera Edición, Ampliada y Corregida. Editorial Nacional de Cuba. Editora del Consejo Nacional de Universidades. La Habana. Tomo I y II. 1965.
- Ruiz, J. Potencial hídrico y curva presión volumen en Chachafruto *Erythrina edulis*. Universidad Nacional de Colombia, Palmira. 60, 1999.
- Rubilar, R., Fox, T., Allen, L., Albaugh T. y Carlson C. Manejo Intensivo al Establecimiento de Plantaciones Forestales de Pinus sp. y Eucalyptus sp. en Chile y Argentina. Instituto Internacional de Nutrición de Plantas. Informaciones agronómicas (40) 1-6. Acassuso, Argentina 2008.
- Sánchez, V, A., López, CH, E., Zepeda, G, J., Barragán, G, S. y Varela, O, J. Documento técnico plantaciones forestales comerciales. PRODEFO. Guadalajara, Jalisco, México. 25, 2005.
- Saquete, A y Lledó, M.J. Seguimiento de variables ecofisiológicas en plantaciones de *Pinus halapensis* Millar, en un ciclo de secado. ¿Puede encontrarse diferente comportamiento en plántones producidos con diferentes sustratos? Actas de la I Reunión sobre Ecología, Ecofisiología y suelos forestales. Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales. (20) 135-140, 2005.
- SEMARNAT. Secretaría del Medioambiente y Recursos Naturales. Indicadores básicos del desempeño ambiental en México. Sistema nacional de información ambiental y de recursos naturales. Gobierno Federal. México, 2003.

- SEMARNAT. Secretaría del Medioambiente y Recursos Naturales. Norma oficial mexicana que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. NOM-021. Secretaría del Medioambiente y Recursos Naturales. México, 2000.
- Taiz, L. y Zeiger, E. Fisiología vegetal, Volumen II, Universidad de California en Los Angeles, U.S.A. 1130, 2006.
- Trujillo, N.E. Informe Técnico del Semillero. Primer Seminario de Plantaciones Forestales. CATIE. Turrialba, Costa Rica, 2005.
- Turcotte, A., Krause, C., Morin, H., Deslauriers, A. and Thibeault, M. The timing of spring rehydration and its relation with the onset of wood formation in blank spruce. *Agricultural and Forest Management Meteorology*. (149) 1403-1409, 2009.
- Urzainqui, P. M. Medidor de humedad Watermark. La medición de la humedad del suelo. <http://urzainqui.galeon.com/productos1497458.html>. Consultado julio del 2010.
- Vázquez, E.B. y Torres, S.G. Fisiología Vegetal I. Editorial Pueblo y Educación. Ciudad de La Habana. 443, 1995.
- Vélez, J.E. Programación de riego en cítricos en base a sensores de medida del estado hídrico del suelo y la planta. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia, España. 113, 2004.
- Villalobos, F.J., Mateos, L., Orgaz, F. y Fereres, E. Fitotecnia, Bases y tecnologías de la producción agrícola. Mundi-Prensa, Madrid, España. 2002
- Villaseñor, L.O.A., Cabanillas B.R.E., Tamayo, E.L.M., Fernández, B.J.A., García, Q.Y., Álvarez, O.P. y Bonilla, V.M. Evaluación del crecimiento de *Cedrela odorata* L. en las condiciones del Valle del Yaqui, Sonora, México. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*. 8 (1) 1-8, 2012.
- Villaseñor, L.O.A. y Cabanillas, B. R. Establecimiento de plantaciones forestales comerciales con sistema de riego por goteo en suelos agrícolas del Valle del Yaqui, México. Vol. 20. *Revista Forestal Baracoa*, Cuba. 25, 2010.

- Villaseñor, L.O.A., Tamayo, E.L.M., Martínez, C.J.L. y Bórquez, O.R. Establecimiento de especies maderables de interés económico bajo riego en suelos agrícolas del sur de Sonora. Informe Anual de Proyectos. Fundación Produce Sonora, A.C. México. 1-8, 2009.
- Wang, Z. and Huang B. Physiological recovery of Kentucky bluegrass from simultaneous drought and heat stress. *Crop Sci.* (44) 1729-1736, 2004.
- Warren C.R. 2007. Does growth temperature affect the temperature responses of photosynthesis and internal conductance to CO₂. A test with *Eucalyptus regnans* *Tree Physiology.* (28) 11–19, 2007.
- Wei X., Waiyanheeli, Y., Pengtao, L., Hailong, L. Zhongjie and Wei. G. Growth in stem diameter of *Larix principis rupprechtii* and its response to meteorological factors in the south of Liupan Mountain. Forestry Ecological and Environmental Key Laboratory of National Forestry Ministry. Academy of Forestry, Beijing, China, 2007.